

51

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT



52

Int. Cl.:

B 23 q, 35/04

B 23 p, 1/12

B 23 p, 13/00

BZ

Deutsche Kl.:

49 m, 35/04<sup>12</sup>

491, 1/12

491, 13/00

10

11

21

22

43

# Offenlegungsschrift 2207 718

Aktenzeichen: P 22 07 718.5

Anmeldetag: 18. Februar 1972

Offenlegungstag: 7. September 1972

30

32

33

31

Ausstellungspriorität: —

Unionspriorität

Datum:	19. 2. 71	22. 2. 71	22. 2. 71
	26. 3. 71	21. 5. 71	28. 5. 71

Land: Japan

Aktenzeichen:	46-8312	46-8305	46-8306
	46-18265	46-34536	46-36270

54

Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zur Formgebung von Werkstücken.

61

Zusatz zu: —

62

Ausscheidung aus: —

71

Anmelder: Inoue-Japax Research Inc., Yokohama (Japan)

Vertreter gem. § 16 PatG: Beetz sen. R., Dipl.-Ing.; Lamprecht, K., Dipl.-Ing.;  
Beetz jun., R., Dr.-Ing.; Patentanwälte, 8000 München

72

Als Erfinder benannt: Inoue, Kiyoshi, Dr., Yokohama (Japan)

10T 2207718

Vgl. Ber. - h. 9/74

Patentanwälte  
Dipl.-Ing. F. DIEZT sen.  
Dipl.-Ing. K. LAMPRECHT  
Dr.-Ing. F. DIEZT jr.  
8 München 22, Steindorferstr. 10

2207718

581-18.369P(18.37OH

18. 2. 1972

INOUE-JAPAX RESEARCH INC., Yokohama (Japan)

Verfahren und Vorrichtung zur Formgebung  
von Werkstücken

Die Erfindung betrifft die Formgebung von Werkstücken, insbesondere die Fertigung von Formwerkzeugen oder dergleichen für oder durch elektrische Bearbeitung und/oder die Fertigung von Elektroden für elektrische Bearbeitung und/oder die Fertigbearbeitung von Vervielfältigungs- oder geformten Stücken zur Verwendung in elektrischer Bearbeitung oder als Erzeugnisse von elektrischer oder mechanischer Bearbeitung.

Unter der Bezeichnung "elektrische Bearbeitung" sollen hier verstanden werden sowohl die elektrische Entladungsbe-

581-(HK 2056)-HdBk

209837/0772

arbeitung (EDM) als auch die elektrochemische Bearbeitung (ECM), die beide elektrische Energie zwischen einer Elektrode und einem Werkstück zuführen, gewöhnlich an einem Kühlmittel-gefüllten Spalt, um Material vom Werkstück in vorbestimmter Weise zu entfernen, und zwar im allgemeinen gesteuert durch die Form der Elektrode. Bei der elektrischen Entladungsbearbeitung ist die dem System Elektrode-Werkstück zugeführte elektrische Energie eine kapazitive Entladung und/oder ein geschalteter Hochenergieimpuls, der einen Durchbruch durch das dielektrische Fluid im Spalt verursacht und eine Funkenentladung erzeugt, die die Elektrode und das Werkstück überbrückt, wobei die hohe kinetische und thermische Energie der Entladung eine mechanische Abtragung des Materials bewirkt, ferner ein örtliches Schmelzen und in gewissem Grad auch ein Verdampfen der Werkstückoberfläche. Bei der elektrochemischen Bearbeitung wird dagegen das Material nach dem Faraday'schen Gesetz als Ergebnis der Zufuhr eines im wesentlichen einsinnigen elektrischen Stroms oder der Verwendung eines elektrischen Stroms mit einsinniger Komponente entfernt, um das Werkstückmaterial im das Kühlmittel bildenden Elektrolyten löslich zu machen.

Die Elektroentladungsbearbeitung, die elektrochemische Bearbeitung und die Hochleistungsformgebung unter Verwendung von Impulsentladungen als die Energiequelle sind bereits in verschiedenen US-PS grundsätzlich beschrieben, die sämtlich auf den Erfinder auch der vorliegenden Erfindung zurückgehen:

3 333 081 vom 25. Juli 1967; 3 378 473 vom 16. April 1968;  
3 232 085 vom 1. Februar 1966; 3 512 384 vom 19. Mai 1970;  
3 417 006 vom 17. Dezember 1968; 3 475 312 vom 28. Oktober 1969;  
3 461 268 vom 12. August 1969; 3 512 384 vom 19. Mai 1970;  
3 536 881 vom 27. Oktober 1970; 3 539 755 vom 10. November 1970;  
3 551 310 vom 29. Dezember 1970.

In diesen US-PS sind verschiedene Verfahren beschrieben, durch die Körper geformt oder in die gewünschte Form gebracht werden können. Es treten jedoch gewisse Schwierigkeiten bei der Fertigbearbeitung von nach diesen Verfahren hergestellten Werkstücken auf, wobei im übrigen auch ohne elektrische Bearbeitungsverfahren die tatsächliche Fertigformgebung von kompliziert geformten Körpern schwierig ist. Ferner erfordern die elektrischen Systeme Formwerkzeuge und Elektroden hoher Genauigkeit, und es ist oft schwierig, Elektroden für die Elektroentladungs- und die elektrochemische Bearbeitung aus Werkstoffen wie Graphit herzustellen, wenn die Form oder Topographie des Körpers komplex ist. Sogar die Fertigbearbeitung von Graphitkörpern ist schwierig, wenn der Körper zur Verwendung in einem EDM- oder ECM-System vorgesehen ist.

In den letzten Jahren ist die Formwerkzeugeanwendetechnologie in vielen Fertigungsbereichen immer wichtiger geworden, indem sie die herkömmliche zerspanende Technologie ersetzt hat, um eine höhere Arbeitsproduktivität zu erreichen. Der Bedarf an Formwerkzeugen ist daher sowohl hinsichtlich der Anzahl als auch der Art immer größer geworden, und die Tendenz zeigt einen weiter erhöhten Bedarf an immer größeren und/oder komplizierteren Formwerkzeugen. Die Herstellung von Formwerkzeugen geht jedoch im allgemeinen langsam vor sich und ist sehr anspruchsvoll und vielseitig, also nach den gegenwärtig verfügbaren Verfahren relativ zeitraubend und teuer. Zum Beispiel muß ein Formwerkzeug, das mit einer üblichen Fräsmaschine hergestellt worden ist, fertigbearbeitet werden, um Fräuserspuren-Kratzer auf der Oberfläche zu entfernen und eine genaue Maßhaltigkeit zu erreichen, was von Hand vorgenommen wird, also verhältnismäßig große Erfahrung und Arbeitszeit mit sich bringt. Die bei einer derartigen aufwendigen Kontrolle und Fertigbearbeitung anfallenden Kosten bilden einen beträchtlichen Anteil der Gesamtkosten für

die Fertigung eines Formwerkzeugs und sogar einen b deutlich n Anteil der Gesamtkosten der durch ein derartiges Formwerkzeug hergestellten Erzeugnisse.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Formgebungssystem anzugeben, das die eben erwähnten Nachteile vermeidet. Insbesondere soll ein Verfahren zur Fertigung eines Formwerkzeugs oder einer Elektrode, zum Beispiel für eine EDM- oder ECM-Vorrichtung, aus Metall oder Graphit mit verbesserter Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei minimalen Kosten angegeben werden. Ferner wird die Schaffung einer verbesserten Vorrichtung zur Fertigbearbeitung von Werkstücken komplizierter Form angestrebt. Schließlich soll die Formgebung von Werkstücken mit höherer Genauigkeit, besserer Oberflächengüte, höherer Reproduzierbarkeit und sehr guter Oberflächenqualität bei niedrigen Kosten und wenig Arbeitsaufwand erreicht werden.

Die Erfindung gibt insbesondere an ein Formgebungssystem vom Kopiertyp (zum Beispiel eine Kopiervorrichtung, die ein Elektrobearbeitungswerkzeug oder ein mechanisch abtragendes Werkzeug wie einen Fräser oder ein Fertigbearbeitungswerkzeug wie eine Hydro- oder Fluiddondüse verwendet), das die Konturen eines Musters, Modells oder einer Schablone in einem Werkstück reproduziert, während vorzugsweise die Werkzeugachse ständig senkrecht zur Abwickelfläche des Werkstücks gehalten wird. Das erfindungsgemäße System beruht auf der Erkenntnis, daß ein genaues mechanisches Bearbeiten oder Zerspanen, elektrisches Bearbeiten und Fluid- oder Hydrohonen eines gekrümmten Werkstücks erfordert, daß die Achse des Werkzeugs, zum Beispiel eines drehbaren Fräsers, einer EDM- oder ECM-Elektrode oder einer Fluiddondüse, genau senkrecht auf einer Ebene steht, die die Tangentialebene an das Werkstück im Bearbeitungspunkt ist, wobei die gedachte Tangentialebene mittels der gewünschten, abzuwickelnden Oberflächenkonfiguration ausgedrückt wird. Die gedachte Tangentialebene an irgendeinem

Oberflächenpunkt kann definiert werden als diejenige Ebene, die zwei zueinander orthogonalen Tangenten gemeinsam ist, die sich in diesem Punkt schneiden.

Eine Kopiermaschine gemäß der Erfindung kann daher aufweisen eine Modellhalte- und -verschiebeeinrichtung, einen Fühlkopf, der mit der gekrümmten Oberfläche zusammenwirkt und wirkungsmäßig mit einem Werkzeugkopf verbunden ist, eine Einrichtung zur beweglichen Halterung des Werkstücks sowie eine Einrichtung zur beweglichen Halterung des Werkzeugkopfs, so daß mindestens fünf Freiheitsgrade an Relativbewegung (das heißt Relativbewegung hinsichtlich mindestens fünf Achsen) zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück möglich sind, wodurch das Werkzeug automatisch positioniert wird an einem Bearbeitungspunkt auf dem Werkstück entsprechend dem Fühl- oder Abtastpunkt des Modells und wodurch die Form des Modells erfaßt wird, um das Werkzeug so auszurichten, daß es senkrecht auf der gedachten Tangentialebene an die zu formende Fläche in diesem Punkt steht.

Bezüglich der Wirkungskopplung oder Verbindung des Abtastkopfs und des Werkzeugkopfs gemäß der Erfindung ist an eine Verbindung gedacht, die diese beiden Glieder zum gleichzeitigen Betrieb des Werkzeugs entsprechend den durch den Abtastkopf erfaßten Konturen vereinigt. Damit soll jedoch nicht gesagt werden, daß eine Zeitverzögerung immer ausgeschlossen sein soll. Zum Beispiel kann die Abtasteinrichtung in größerem Abstand von der Formgebungseinrichtung angeordnet sein, wobei die Ausgangssignale des Abtasters in den Werkzeugkopf über ein Nachrichtenübertragungsnetzwerk mit unvermeidbaren Verzögerungen eingespeist werden. Ferner können die Ausgangssignale des Abtastkopfs aufgezeichnet oder elektronisch abgewandelt und zum nachfolgenden Gebrauch bei der Werkzeugbetätigung gespeichert werden. Das letztere System kann benutzt werden, wenn eine Anzahl von Formwerkzeugen mit identischen Formen oder mit

Abmessungen hergestellt werden soll, die schrittweise zunehmen. In letzterem Fall kann ein einziges Modell verwendet werden, wobei zu der gespeicherten Information Inkremente addiert werden können, um die schrittweise Maßänderung zu erzielen.

Gemäß einem wichtigen Erfindungsmerkmal ist das Werkstück montiert auf einer Plattform, einem Tisch oder einem Wagen oder Schlitten, während der Werkzeugkopf dazu benachbart ist. Das Minimum von fünf relativen Freiheitsgraden kann dann erreicht werden durch Bewegungen im cartesischen Koordinatensystem oder im Polarkoordinatensystem oder in einem Hybridsystem von beiden. In allen Fällen sind jedoch mindestens zwei Winkelverschiebungen, das heißt Drehungen oder Schwenkungen, des Werkzeugkopfs in aufeinander senkrechten Ebenen erwünscht, wobei vorzugsweise das Werkstück auch drehbar sein sollte. Das Werkstück kann also so montiert werden, daß es verschwenkbar ist um eine Achse senkrecht zur Werkzeugachse und getrennt von oder zusammenfallend mit dem Bearbeitungspunkt an der Werkstückoberfläche. Diese erste Schwenkachse muß, wenn sie gegen den Bearbeitungspunkt versetzt ist, mit einer Axialverschiebung des Werkzeugs verknüpft sein, das heißt mit einer Verschiebung des Werkzeugs entlang dessen eigener Achse, um ein senkrechtes Angreifen der Bearbeitungsstelle zu gewährleisten. Außerdem kann die erste Schwenkachse des Werkzeugkopfs zum Werkstück drehbar sein, um den dritten Freiheitsgrad zu ergeben, und entweder der Kopf oder das Werkstück können um zueinander senkrechte Inkremente entsprechend zum Beispiel der X- und Y-Achse verschiebbar sein; schließlich können zur richtigen Positionierung zusätzliche Freiheitsgrade erwünscht sein, wie noch erläutert werden wird.

In vorteilhafter Weiterbildung der Erfindung ist der Abtaster gegen die gekrümmte Oberfläche des Modells durch Fluiddruck vorgespannt, zum Beispiel gegen die Rückstellkraft einer

Feder, und mit Lineardifferenztransformatoren versehen, die als mechanoelektrische Meßumformer oder Signalumformer dienen. Mindestens drei voneinander getrennte Abtastfinger sind im Abtastkopf vorgesehen, um das Minimum von drei Lagesignalen zu erzeugen, die eine Ebene definieren. Wenn die drei oder mehr Punkte die interessierende Stelle umgeben, definieren die Punkte eine gedachte Ebene senkrecht zur Oberfläche an diesem Punkt. Ferner ist es vorteilhaft, einen zentralen Fühler, Abtaster oder Stift zu benutzen, der durch die minimalen drei Finger oder Abtaster, die bereits erwähnt wurden, umgeben ist, um die Konkavität oder Konvexität der Oberfläche, das heißt positive oder negative Krümmung, anzuzeigen. Der Abtaster kann in Abhängigkeit von der Lage des zentralen Fühlers relativ zur peripheren Fläche von Fühlern jede komplexe Topographie in konvexe und konkave Bereiche auflösen, und das Werkzeug entsprechend ausrichten.

Die Erfindung wird ferner dadurch ausgestaltet, daß die Abtaster Ausgangssignale in Form von Lageanalogsignalen erzeugen, die als Eingangssignale für einen Analog-Digital-Umsetzer dienen. Dessen Ausgangsimpulse werden zur Steuerung von inkrementweise betätigbaren Stell- oder Servomotoren benutzt (für das Werkzeug, wenn keine mechanische Kupplung vorgesehen ist, oder für den Abtastkopf, wenn letzterer mechanisch mit dem Werkzeugkopf für eine gemeinsame Positionierung und Ausrichtung von Werkzeug und Abtaster verbunden ist). Für die beiden Schwenk- oder Drehfreiheitsgrade des Werkzeugkopfs ist in der Schaltung des Abtasters ein Analoganalysator vorgesehen, dessen Transfer- oder Übertragungsfunktion eine trigonometrische Beziehung zwischen Lageinkrementen und Schwenkwinkel ist. Wenn z.B. zwei Abtaster um einen Abstand  $L$  voneinander getrennt sind und sich normalerweise auf derselben Höhe befinden, wobei sie axial um



das Inkrement  $\Delta x$  versetzt sind, ist die durch die Abtaster-  
spitzen definierte Linie gekippt um den Schwenkwinkel  $\Delta \theta =$   
 $\tan^{-1} (\Delta x/L)$ . Das entsprechende Transfer- oder Übertra-  
gungsfunktionsnetzwerk ist selbstverständlich für jeden Ro-  
tationsfreiheitsgrad vorgesehen und kann mit seinem Ausgang  
an einen entsprechenden Analog-Digital-Umsetzer zum Pulsen  
der Stellmotoren für die Drehung angeschlossen sein.

Ein weiteres wichtiges Merkmal der Erfindung ist die Fertig-  
bearbeitung oder Oberflächenveredlung des wie eben beschrieben  
erzeugten Werkstücks durch Fluid- oder Hydrohonen, wobei vor-  
teilhafterweise die Modellkopiermaschine oder eine ähnliche Ma-  
schine verwendet wird. In diesem Fall beinhaltet der Fertigbe-  
arbeitungsvorgang das Mitreißen von Abriebsubstanzen, zum Bei-  
spiel Siliziumkarbid, Diamant, Wolframkarbid, Aluminiumoxyd  
oder flüssigen Medium, vorzugsweise in letzterem. Die Flüssig-  
keit kann ein Elektrolyt sein und ist erfindungsgemäß von  
elektrischer Bearbeitung begleitet, das heißt elektrochemischer  
Entfernung von Werkstückmaterial. In einem typischen Fall er-  
fordert die manuelle Oberflächenvergütung eines Stahlwerkstücks  
bis zu einer Oberflächengüte von  $25 \mu\text{m } H_{\text{max}}$  16 h, während eine  
Oberflächengüte von  $3 \mu\text{m } H_{\text{max}}$  gemäß der Erfindung in einem  
geringen Bruchteil dieser Zeit, nämlich in 45 min, erreichbar  
ist. Die Fluidhonorvorrichtung gemäß der Erfindung macht Gebrauch  
von einer Fünf-Achsen-Anordnung oder von fünf Freiheitsgraden  
zwischen der Vergütungsdüse und dem Werkstück, wobei vorzugs-  
weise die Düse senkrecht zum Werkstück durch eine oben beschrie-  
bene Einrichtung gehalten ist, und wobei die Vorrichtung mit  
einer Stelleinrichtung oder einem Servomechanismus von der ein-  
gangs in den EDM- oder ECM-Patentschriften beschriebenen Art  
versehen sein kann, um einen konstanten Spaltabstand zwischen

BAD ORIGINAL

209837/0772

der Düse und dem Werkstück aufrechtzuerhalten. Vorzugsweise werden die Pulverteilchen und die Trägerflüssigkeit von der Bearbeitungsstelle abgesaugt.

Die Erfindung wird ferner dadurch ausgestaltet, daß das Fluidhonen durchgeführt wird mit einem Elektrolyten unter Anwendung elektrochemischer Bearbeitungsprinzipien zusammen mit dem Einblasen eines Gases in den Hochdruckstrom. Vorteilhafterweise ist das Gas Luft und wird bei einem Druck an der Düse von 2 bis 20 at verwendet, wobei der Elektrolytdruck 1 at betragen kann. Wenn das Gas, der Elektrolyt und die Pulverteilchen mit elektrochemischem Honen kombiniert werden, werden optimale Ergebnisse erreicht. Obwohl diese Ergebnisse nicht in allen Einzelheiten erklärt werden können, sei darauf hingewiesen, daß die Zufuhr von Gas mit dem angedeuteten Druck und Verwendung einer Düse für diese Zwecke beträchtlich die Glätte der Oberfläche im Vergleich mit allen Ergebnissen erhöht, die bei bloßer elektrochemischer Bearbeitung oder bei bloßer Abriebbearbeitung erwartet werden können.

In vorteilhafter Weiterbildung der Erfindung wird ferner ein System zur automatischen Vervielfältigung eines einzigen oder einer Serie von Werkstücken angegeben, wobei die erste Stufe die Fertigung einer Zeichnung und/oder eines Modells in irgendeiner zweckmäßigen Weise ist. Das Modell dient als Vorlage für eine Kopierfräsmaschine der unten beschriebenen Art, während das Werkstück in der letzteren ein Elektrodenmaterial für EDM- oder ECM-Bearbeitung sein kann. Vorteilhafterweise wird die so erzeugte Elektrode durch einen automatischen Förderer zu einer Kontrollstation transportiert und danach zu einer ECM- und/oder EDM-Vorrichtung, wie sie in den eingangs genannten Patentschriften beschrieben ist. Der automatische

Förderer kann danach das vorgeformte Werkstück zu einer ECM-Fertigbearbeitungsmaschine transportieren und dann zu einer Kopierfertigbearbeitungs- oder Honvorrichtung, wie noch genauer erläutert werden wird. Das Ausgangsmodell kann als das Muster oder die Vorlage in dieser Kopierfertigbearbeitungsvorrichtung dienen, und zwar entweder durch die Verwendung von rechnergespeicherter Information oder durch direkten Transport des Modells zur Vorrichtung. Nach einer Werkstückkontrolle, wobei das Werkstück unter Verwendung der rechnergespeicherten Information mit dem Modell verglichen wird, kann das Modell erneut verwendet oder aussortiert werden. Die verschiedenen Förderer, Kontrollstationen und Maschinen werden vorteilhafterweise durch eine gemeinsame Fortschaltstufe gesteuert. Die Maschinen können numerisch gesteuert sein oder durch Analogschaltungen betrieben werden, wie ebenfalls noch genauer gezeigt werden wird.

Die Erfindung wird anhand der Zeichnung näher erläutert.  
Es zeigen:

Fig. 1 einen Axialschnitt, teilweise schematisch, eines Signal-erzeugenden Abtasters gemäß der Erfindung, wobei die äußere Form eines Modells oder einer Vorlage umgesetzt werden in Steuersignale für Rechnerspeicherung und weitere Verwendung, wobei die Signale sofort für eine direkte Steuerung einer Formgebungsmaschine usw. benutzt werden;

Fig. 1A einen Querschnitt IA-IA gemäß Fig. 1;

Fig. 1B eine Detailansicht, und zwar in Axialschnitt und teilweise schematisch, von einem der Abtastelemente des Abtastkopfs von Fig. 1 oder irgendeiner ähnlichen Abtasteinrichtung;

Fig. 2 eine vertikale Seitenansicht, teilweise schematisch, einer Modellformmaschine gemäß einem Ausführungs-

beispiel der Erfindung, die einen Abtaster vom Typ gemäß Fig. 1, 1A und 1B benutzt, wobei auch andere Erfindungsmerkmale ersichtlich sind;

- Fig. 3 eine Ansicht ähnlich Fig. 1 von Einzelheiten eines anderen Abtastkopfs;
- Fig. 3A eine Endansicht des Abtastendes des Kopfs von Fig. 3;
- Fig. 4 und 5 vertikale Querschnitte von verschiedenen Lagen bestimmter Punkte des Kopfs von Fig. 1;
- Fig. 6 eine schematische Seitenansicht von Bewegungen eines Werkzeugs gemäß der Erfindung;
- Fig. 7 das Schaltbild einer Einrichtung zur Ableitung der Ausgangssignale der Abtaster der Köpfe von Fig. 1 und 3;
- Fig. 7A ein anderes Schaltbild zur Erläuterung des Betriebs der Abtastköpfe;
- Fig. 8 ein Blockschaltbild zur Erläuterung von anderen Merkmalen der erfindungsgemäßen Schaltung;
- Fig. 9 ein Blockschaltbild mit den Transfer- oder Übertragungsfunktionen von einigen Elementen der Abtasterausgangssignalsschaltungen gemäß der Erfindung;
- Fig. 10 eine vertikale Seitenansicht, teilweise schematisch, einer Vorrichtung zur direkten Erzeugung der Form eines Modells in einem Werkstück gemäß der Erfindung;
- Fig. 11 eine Seitenansicht der Vorrichtung von Fig. 10;
- Fig. 12 eine Detailansicht des Abtastkopfs gemäß der Erfindung;
- Fig. 13 eine Seitenansicht, teilweise aufgebrochen und teilweise schematisch, einer weiteren Maschine mit erhöhter Beweglichkeit oder zusätzlichen Freiheitsgraden für die Betätigung des Kopfs, der als ein Abtaster oder als ein Werkzeug vor-gesehen sein kann gemäß der Erfindung;

Fig. 14 eine Vorderansicht der Maschine von Fig. 13;

Fig. 15 eine Ansicht ähnlich Fig. 14 einer Modellvervielfältigungsmaschine, wobei der Abtastkopf und der Bearbeitungskopf als Mehrfachwerkzeug-Revolver- oder Drehköpfe ausgebildet und miteinander gekuppelt sind;

Fig. 15A eine Schnittansicht XVA-XVA gemäß Fig. 15;

Fig. 15B eine Seitenansicht der Kupplung oder Verbindung von Fig. 15;

Fig. 16A eine Seitenansicht, in schematischer Form, einer anderen Modellkopiermaschine, deren Köpfe mehrere Freiheitsgrade haben und miteinander durch eine andere Verbindungseinrichtung gekuppelt sind;

Fig. 16B eine Frontansicht der Maschine von Fig. 16A;

Fig. 17 eine Frontansicht einer Abwandlung der Kopf- und Verbindungs konstruktion;

Fig. 17A eine Schnittansicht gemäß XVIIIA-XVIIIA von Fig. 17;

Fig. 18 eine Seitenansicht eines Mehrfachbewegungskopfs gemäß der Erfindung in einer Maschine, in der das Werkstück oder das Modell drehbar ist;

Fig. 18A eine Frontansicht der Maschine von Fig. 18;

Fig. 18B eine Seitenansicht eines anderen Bearbeitungskopfs, der in der Maschine von Fig. 18 benutzt werden kann;

Fig. 18C eine Frontansicht des letzteren Kopfs;

Fig. 18D eine Seitenansicht eines weiteren Kopfs;

Fig. 18E die Frontansicht des letzteren Kopfs;

Fig. 19 eine Draufsicht, teilweise schematisch, zur Erläuterung der Bewegung des Abtastkopfs oder des Werkzeugs gemäß einem weiteren Merkmal der Erfindung, wobei die gekrümmte Bewegung des Kopfs mindestens teilweise durch eine Anordnung von gekrüppfter Stange oder Kurbelwelle mit Stange erreicht wird;

Fig. 20 eine Seitenansicht einer weiteren Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, teilweise aufgebrochen;

Fig. 20A eine Frontansicht der Vorrichtung von Fig. 20;

Fig. 21 eine vertikale Seitenansicht, teilweise im Querschnitt, einer Fertigbearbeitungs- oder Oberflächenveredlungsvorrichtung gemäß der Erfindung;

Fig. 21A eine Ansicht ähnlich Fig. 21, jedoch einer abgewandelten Vorrichtung; und

Fig. 22 ein Blockschaltbild zur Erläuterung von verschiedenen prinzipiellen Erfindungsmerkmalen.

In Fig. 1 und 1A ist ein Abtastkopf abgebildet, der in Steuersystemen für ein Werkzeug oder ein Werkstück wie oben beschrieben verwendet werden kann. Wie bereits eingangs festgestellt wurde, ist es erfindungsgemäß wichtig, daß unabhängig von der Form des Werkstücks die Achse des Werkzeugs immer senkrecht zur Oberfläche gehalten wird, das heißt senkrecht zu einer Tangente an die Oberfläche im Punkt, in dem die Werkzeugachse die Werkstückoberfläche schneidet. In diesem Fall wird eine äußerst genaue und sehr glatt bearbeitete Oberfläche erhalten, die praktisch frei von Werkzeugspuren und Kratzern ist, wie sie bei üblichen dreidimensionalen Fräsern auftreten. Um diese Ausrichtung zu gewährleisten, sind die Werkzeuge gemäß der Erfindung mit einer Einrichtung versehen, die so viel Bewegungsfreiheitsgrade erlaubt, daß unabhängig von der Form des Werkstücks das Werkzeug sich automatisch ausrichtet, um der äußeren Form oder Kontur zu folgen.

Ein Signal zur Ausrichtung des Werkzeugs kann daher eine Anzahl von Komponenten haben, und zwar einschließlich mindestens drei Komponenten, die den cartesischen Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  oder drei Polarkoordinaten mit  $r$  (Radius) und zwei Winkeln  $\phi$  und  $\theta$ .

entsprechen. Diese Koordinaten definieren selbstverständlich für jeden interessierenden Ort im Raum die Tangente und eine Normale oder Senkrechte auf der Tangente zur Ausrichtung des Werkzeugs. Anders ausgedrückt, mindestens fünf Freiheitsgrade müssen für das Werkzeug vorgesehen sein, und entsprechend mindestens fünf Signale, die diese Freiheitsgrade oder Kombinationen davon darstellen, müssen erzeugt oder abgeleitet werden durch einen Abtaster für die Zwecke der Erfindung. Vorsorglich sei darauf hingewiesen, daß in manchen Fällen es zweckmäßig ist, die Signale und die Eingangssignale, die die verschiedenen Freiheitsgrade darstellen, so zu verknüpfen, daß die tatsächlich zur direkten Steuerung des Werkzeugs oder Werkstücks verwendeten Signale Hybridsignale der erwähnten Koordinatensignale sein können.

Ferner kann der Abtaster von Fig. 1 benutzt werden, um ein Ausgangssignal zu erzeugen, das direkt ein Werkzeug entsprechend den Modellvervielfältigungsprinzipien steuert, die unten anhand der verschiedenen Maschinen erläutert werden. Wahlweise kann der Abtaster ein Ausgangssignal erzeugen, das aufgezeichnet oder gespeichert wird als Teil eines Programms in einem fortschaltenden Rechner oder über eine numerische Einrichtung, so daß ein programmiertes Werkzeug oder eine programmierte Maschine nacheinander, gleichzeitig oder mit irgendeiner gewünschten Zeitverzögerung betrieben werden können, um das abgetastete Modell zu reproduzieren. Eine weitere Alternativlösung besteht darin, daß die vom Abtaster erhaltenen Signale mit Signalen verglichen werden, die eine Sollform darstellen oder von einem Modell erhalten sind, um die Reproduktionsqualität zu überprüfen und Fehler anzuzeigen, falls es erwünscht ist. Der Abtaster von Fig. 1 hat ein Gehäuse 101, von dessen einem Ende ein Stift 102 vorspringt, der den Anker 103 eines Lineardifferenztransformators 103a bildet, dessen Spulen schematisch in Fig. 1B abgebildet sind, der

Differenztransformator als Ganzes ist dabei durch die Bezugshohl 103a in Fig. 1 dargestellt. Der Stift 102 ist in einer Bohrung 101a des Gehäuses verschiebbar und kann mit einem Gleitlager 102a versehen sein, um das Spiel des Stifts in der Bohrung auf ein Minimum zu reduzieren. Der Stift 102 liegt an einer Abtastplatte 104 an, die immer tangential an einer konvexen Oberfläche S liegt, gegen die sie gedrückt werden kann. Ein kugelförmiger konvexer Vorsprung 105a geht von der Platte 104 aus und wird vom Stift 102 beaufschlagt.

Vier zusätzliche Abtastfinger 105a, 105b, 105c und 105d sind axial in Zylindern 105e über entsprechende Kolben 105f geführt, wobei die Zylinder über eine Leitung 105g mit einer Druckfluidquelle in Verbindung stehen, um die Finger mit konstanter Kraft nach unten vorzuspannen. Die Lineardifferenztransformatoren sind mit diesen Fingern gekoppelt, nämlich 105h und 105i für 105a bzw. 105c, usw., wie im einzelnen aus der Zeichnung ersichtlich ist, und arbeiten mit den Spulen und Ankern gemäß Fig. 1B zusammen, während jeder Finger und der Stift 102 aufwärts durch eine entsprechende Zugfeder 106 vorgespannt sind.

Es sei jetzt Fig. 4 und 5 betrachtet. Daraus ist ersichtlich, daß, wenn die Platte 104 senkrecht zur Achse A des Abtastkopfs gegen die Oberfläche S des Modells gehalten wird, diese nur an einem Punkt  $P_1$  berührt wird, der von einem Punkt  $P_2$  getrennt ist, der den Schnitt der Achse A mit der Oberfläche S darstellt, wobei der Punkt  $P_1$  einen Schwenkpunkt darstellt, so daß der Finger 105a eine abwärts gerichtete Kraft F entlang der Achse A an einem Punkt ausübt, der um einen Abstand  $L_2$  vom Punkt  $P_1$  getrennt ist. Ähnlich wird die Kraft F durch den Finger 105c auf die Platte 104 im Abstand  $L_1$  vom Punkt  $P_1$



ausgeübt, wonach ein Moment  $M_1$  im Gegenuhrzeigersinn und ein Moment  $M_2$  im Uhrzeigersinn auf die starre Platte ausgeübt werden.  $M_1$  übertrifft  $M_2$  um  $F \times (L_1 - L_2)$ , so daß die Platte 104 um den Punkt  $P_1$  in Gegenuhrzeigersinn verschwenkt wird, bis sie die in Fig. 5 abgebildete Lage eingenommen hat, wodurch die Momente  $M_1$  und  $M_2$  gleich groß werden.

Der Finger 105a ist aus seiner Ausgangsstellung (Fig. 4) angehoben worden, während der Finger 105b abgesenkt worden ist, so daß Ausgangssignale von den entsprechenden Lineardifferenztransformatoren erzeugt worden sind, um die Ausrichtung der Platte 104 anzuzeigen. Da vier derartige Ausgangssignale erhalten werden, ist die Ausrichtung in der Platte 104 positiv bestimmt als tangential zur Oberfläche, und ein Werkzeug wird entsprechend gesteuert. Da der Krümmungsmittelpunkt des Vorsprungs 104a in den genauen Schnittpunkt der Achse A mit der Unterseite der Platte 104 zentriert ist, wenn letztere senkrecht auf den Fingern 105a bis 105d und dem Stift 102 steht, kann eine einfache Verschwenkung der Platte entlang der Oberfläche ohne irgendeine axiale Verschiebung des Mittelpunkts stattfinden. Im allgemeinen wird jedoch die Bewegung eine Folge einer Verschiebung vom Punkt  $P_1$  zum Punkt P sein, was einer vertikalen Verschiebung  $\Delta Z$  entspricht. Diese axiale Verschiebung wird selbstverständlich durch den Stift 102 und dessen Differenztransformator erfaßt.

Das zusammengesetzte Signal stellt dar die Ortsveränderung der Normalen N von der Achse A und kann dargestellt werden in Signalen des cartesischen Koordinatensystems, in aus den cartesischen Signalen gewonnenen geometrischen Signalen, in Polarsignalen oder in irgendeiner Synthese oder Hybridenverknüpfung davon, wie noch ersichtlich sein wird. Die Lage der Normalen N

wird zusammen mit der Verschiebung  $\Delta Z$  in eine ähnliche Normalenabweichungsverschiebung zum Beispiel eines Werkzeugs 107 in dessen Halter 108 umgesetzt, um die Werkstückoberfläche W zu formen (Fig. 6). Wenn das Eingangssignal des Werkzeugs ein cartesisches Signal ist, kann ein Schlitten oder Wagen die Achse  $T_1$  nach links ( $T_2$ ) um einen Abstand  $\Delta X$  verschieben, den Drehpunkt des Werkzeugs T um einen Abstand  $\Delta Z$  absenken und das Werkzeug um die Achse C um einen Winkel  $\Delta \theta$  drehen oder verschwenken, um es richtig in Übereinstimmung mit einer Normalen zum Modell und zur Werkstückoberfläche zu positionieren. Selbstverständlich ist bei einer dreidimensionalen Form auch eine Drehung um die Achse D um den Winkel  $\Delta \theta'$  erforderlich. Der Abstand des Mittelpunkts C oder der Achse D vom Werkstück, dargestellt durch das Ausgangssignal des Differenztransformators, der dem Stift 102 zugeordnet ist, kann bei 1 eingestellt sein. Es sollte ersichtlich sein, daß vier bis fünf Signale ausreichen, um das Werkzeug senkrecht zur Werkstückoberfläche auszurichten, damit es wirksam entsprechend dem Modell die Oberfläche bearbeitet.

In Fig. 3 ist ein Abtastkopf gezeigt, der sich vom Abtastkopf in Fig. 1 dadurch unterscheidet, daß keine Platte vorhanden ist, um die Tangentialfläche zu definieren, zu der die Normalen- oder Senkrechtenlage ausgerichtet wird. In diesem System sind die Abtastfinger 205a, 205c, 205d an den Ecken eines Quadrats eng benachbart angeordnet, und sie umgeben oder bilden einen Käfig für den zentralen Stift 202. Die Finger 205a bis 205d sind nach außen und oben gekrümmt, um Magnetanker 203a, 203b und so weiter zu tragen, die mit den Spulen der Linear-differenztransformatoren 203a', 203b' usw. zusammenwirken. Die Abtastfinger sind auch an Schraubenfedern 206a, 206b wie oben beschrieben aufgehängt, während der zentrale Finger 202

den Anker 203 trägt, der mit dem Lineardifferenztransformator 203' zusammenarbeitet und an der Feder 206 aufgehängt ist. Dieses Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem in Fig. 1 dadurch, daß die Platte im allgemeinen tangential nur an einem Punkt an der Oberfläche ist und die Ausgangssignale der verschiedenen Lineardifferenztransformatoren ausschließlich die Normale an die Tangentialebene in diesem Punkt bestimmen. Bei komplizierten Formen oder Konturen kann jedoch die Platte 104 zwei oder mehr Spitzen oder Höhenpunkte überbrücken, so daß ihre Ausrichtung nicht länger eine richtige Tangentialebene an irgendeinem Höhepunkt darstellt. In diesem Fall kann das System von Fig. 3 und 3A benutzt werden, wobei die Finger 205a bis 205d ausreichend eng zueinander benachbart sind, um eine gedachte Tangentialebene zu definieren, von der die Normalenlage abgeleitet werden kann.

Das System von Fig. 3 kann auch benutzt werden, um das Werkzeug zu steuern, in welchem Fall die Finger 205a bis 205d durch entsprechende Stell- oder Servomotoren angetrieben werden können, in die ein Steuersignal von einem Abtaster eingespeist wird und die ein schwebendes Gehäuse 201 positionieren, um das Glied 202 entlang einer Normalen oder Senkrechten auf der Oberfläche auszurichten. In diesem Fall kann der Finger 202 durch ein Werkzeug ersetzt werden, zum Beispiel eine Elektrode (im Fall einer Elektroentladungsbearbeitung oder elektrochemischen Bearbeitung) oder durch eine Material abtragende mechanische Einrichtung wie ein Fräswerkzeug.

In Fig. 2 ist eine Vorrichtung zur Reproduktion oder Vervielfältigung der Form eines Modells oder einer Vorlage oder eines Musters gezeigt, wie sie zur Elektrodenfertigung für EDM- oder ECM-Systeme benutzt werden kann, wie noch genauer be-

schrieben werden wird. Die Vorrichtung hat in diesem Fall einen Abtastkopf 301 mit einer äußeren Anordnung von Fingern 305a, 305b usw. und einem zentralen Finger 305, wie für die Abtaster von Fig. 1 und 3 beschrieben ist. Der Kopf 301 ist auf einer Schiene 301 in horizontaler Richtung 301a verschiebbar und von Säulen 310' auf einem Grundteil 310" oberhalb eines Quervorschubs 311 verschiebbar. Die Quervorschubeinrichtung hat einen Tisch 311a, der auf einer geeigneten V-Führung senkrecht zur Ebene des Tisches und zur Schiene 310 verschiebbar ist, sowie einen Tisch 311b, der parallel zur Schiene 310 verschiebbar ist. Die Säulen 310' können mit Leitspindeln versehen sein, um den Kopf 301 anzuheben und abzusenken. Mit anderen Worten, die Schlitten- und Kopfpositioniereinrichtungen erlauben eine Positionierung des Kopfs an irgendeinem Punkt auf der Schablone oder dem Modell S. Eine derartige Positionierungseinrichtung verwendet die drei linearen oder cartesischen Koordinaten einschließlich aufeinander senkrechten Bewegungen in der Horizontalebene, entsprechend der X- und Y-Koordinate, und einer Bewegung in vertikaler Richtung entsprechend der Z-Koordinate. Es ist ersichtlich, daß ein Polarkoordinatensystem ebenfalls benutzt werden könnte, um den Abtaster an irgendeinem Punkt zu positionieren, wie weiter unten erläutert werden wird. Die Bewegungen der Vorlage, des Musters oder des Modells werden durch einen Programmgeber 320 gesteuert, der die Lage des Modells mit der des Werkstücks W positioniert und durch einen Zeitgeber wie einen Taktimpuls-generator 320a ausgelöst werden kann. Die Ausgangssignale vom Kopf 301 werden bei 301a zu einem Signaldiskriminator übertragen, zum Beispiel einem Analysator 321, dessen Funktion es ist, die Signale der einzelnen Abtastfinger in Bewegungen eines Werkzeugs T hinreichend umzusetzen, um letzteres an einer Normalen auf der Oberfläche im geeigneten Punkt auszu-

richten, an dem das Werkstück W ausgerichtet werden kann. Der Analysator kann also Ausgänge 321a, 321b und 321c entsprechend den drei Ausrichtungskoordinaten des Werkzeugs T haben.

Das Werkzeug, ein Fräser, wird um seine Achse  $T_a$  durch einen Motor 322 im Kopf gedreht, wobei der Motor mit elektrischer Energie durch nicht gezeigte Leitungen versorgt wird. Der Kopf, der den Motor enthält, ist um eine Achse  $H_a$  verschwenkbar, die senkrecht auf der Zeichenebene steht, und zwar durch ein Ritzel 322a, das mit einer Zahnstange 322b kämmt, die auf der Achse  $H_a$  verdreht ist. Zusätzlich kann das Zahnstangen/Ritzel/Kopf-System 322, 322a und 322b vertikal in Pfeilrichtung V entsprechend der vorher erwähnten x-oder y-Koordinate verschoben werden. Zu diesem Zweck ist der Schlitten 322c auf einer Säule 322d gelagert, die eine vertikale Führung bildet. Der vertikale Antrieb kann durch eines der Eingangssignale vom Analysator 321 realisiert werden. Ein anderes Eingangssignal dieses Analysators 321 dreht eine Leitspindel 322e, um den Halter 322f zur Säule 322d zu verschieben und dadurch eine Relativbewegung des Werkzeugs und des Werkstücks entsprechend der z-Koordinate zu erzielen. Die Verdrehung des Kopfs um die Achse  $H_a$  kann von einem anderen Eingangssignal vom Analysator 321 herrühren, während noch ein weiteres Eingangssignal die Kopfanordnung um eine vertikale Achse drehen kann, wie durch einen Pfeil  $H_b$  angedeutet ist.

Das Werkstück W ist außerdem von einer Quervorschubeinrichtung 323 getragen, die Schlitten 323a und 320b hat, die entlang der x - bzw. y-Koordinate verschiebbar sind, sowie möglicherweise einen Drehtisch aufweist, wenn eine Drehbewegung erwünscht ist.

Von einem Eingangssignal, das durch die Abtaster dargestellt wird, kann das Werkzeug T zu den verschiedenen Koordinaten verschoben werden, wie in Verbindung mit Fig. 6 beschrieben ist, um eine Lage anzunehmen, in der seine Achse  $T_a$  senkrecht auf der gedachten Tangentialebene an die bearbeitete Werkstückoberfläche liegt, wie in Verbindung mit Fig. 6 beschrieben ist.

Fig. 7 zeigt einen Teil eines Signalanalysators für einen Abtaster gemäß der Erfindung, wobei der Abtaster einen Lineardifferenzverstärker 403a aufweist, der mit dem Anker 403 von einem der Finger oder Fühler zusammenarbeitet, die in Zusammenhang mit Fig. 1 oder 3 beschrieben sind. Der Lineardifferenzverstärker 403a hat eine Eingangsspule 403a' und zwei Ausgangsspulen 403a'' und 403a''' . Eine Wechselstromquelle 421a des Analysators 421 ist an die Spule 403a' angeschlossen und liefert elektrischen Strom an die Mittellanzapfung des Differenztransformators über einen Isolier- oder Trenntransformator 421b.

Jede der Spulen 403a'' und 403a''' ist in Reihe mit der Sekundärwicklung des Trenntransformators 421b, entsprechenden Gleichrichterdiolen 421c und Lastkreisen, dargestellt durch Widerstände 421d, geschaltet. Kondensatoren 421e sind an die Ausgangswiderstände angeschlossen. Es ist ersichtlich, daß der Analysator 421 von Fig. 7 ein Phasendiskriminator ist, der ein Ausgangssignal entsprechend der Ortsveränderung des Kerns 403 aus dessen Mittellage erzeugt. Wenn zum Beispiel der Kern oder Anker 403 des Abtasters nach unten verschoben wird, wird die Kopplung zwischen den Spulen 403a' und 403a'' erhöht, während die Kopplung zwischen den Spulen 403a' und 403a''' abnimmt. Das Phasenverschlebungsausgangssignal, das über das Netzwerk 421 e, 421d integriert wird, speist ein

Signal, das analog der Verschiebung ist, in den einen Eingang des Verstärkers 424. Wenn der Anker 403 sich in der entgegengesetzten Richtung bewegt, wird ein vergleichbares Signal in den anderen Eingang des Verstärkers 424 eingespeist. Der Verstärker 424 kann irgendein üblicher Analog-Servoverstärker sein (vgl. z. B. Seiten 177 ff von SERVO-MECHANISM PRACTICE, Mc Graw-Hill Book Co., New York 1960). Das verstärkte Signal wird einem Stell- oder Servomotor 424a zugeführt, der ein Absperrorgansteller sein kann (vgl. Seiten 403 ff der eben erwähnten Monographie), um ein Absperrorgan 424b des Pneumatiksystems zu steuern, das den Finger gegen das Modell vorspannt. Der Stellmotor 424a ist also Bestandteil eines Rückkopplungskreises, der gemäß den Prinzipien der Ortsservosteuerung gewährleistet, daß das Ausgangssignal immer die Lage des Abtasters darstellt (vgl. Seiten 89 ff der erwähnten Monographie). Ein anderes Ausgangssignal wird bei 424c abgeleitet und kann in den Stellmotor eingespeist werden, um das Werkzeug zu steuern.

In Fig. 7A ist eine Abwandlung der Grundschaltung von Fig. 7 gezeigt, wobei Jedes der Ausgangssignale, das an den Widerständen 421d für ein Paar von Abtastern abgenommen wird, zum Beispiel die den Ankern 503a und 503b zugeordneten, in einen Vergleicherverstärker 524 eingespeist wird, um eine Relativverschiebung der beiden Abtaster zu definieren und damit die Neigung einer Linie, die die Spitzen der Abtaster mit der Mittellage verbindet. Auch hier wird das Ausgangssignal in den Stellmotor 524a eingespeist und damit in einen Rückkopplungsweg 524b zu den Abtastern. Das Stellsignal zur Drehung des Kopfs gemäß der Neigung der Tangentialebene kann dann in einen der Stellmotoren des Kopfs bei 524c wie oben beschrieben eingespeist werden. Die Systeme von Fig. 7 und 7A können in Blockschaltbildform in Fig. 8 zusammengefaßt werden, wo die Ab-

tasterlage bei einem Block 603 abgeleitet wird, dessen Ausgangssignal, ausgedrückt in der Phasendifferenz, in den Phasendiskriminator 621 eingespeist wird, dessen analoges Ausgangssignal bei 624 verstärkt wird. Anstelle einer direkten Analogsteuerung wird in diesem Ausführungsbeispiel die Umsetzung des Analogsignals in ein Digitalsignal in einem Analog-Digital-Umsetzer 624d und die Steuerung des Abtasters durch einen pulsmodulierten Stellmotor 624a vorgezogen. Die Digitalimpulsfolge wird hier auch benutzt, um ein Werkzeug-Schrittschaltwerk 624c zu betätigen. Der Analog-Digital-Umsetzer kann einen an sich bekannten Aufbau haben (vgl. z.B. Seiten 674 und 675 von PULSE, DIGITAL AND SWITCHING WAVEFORMS, McGraw-Hill Book Co., New York, 1965). Der Stellmotor 624a ist bei 624b zurückgekoppelt, wie bereits erläutert wurde.

Fig. 9 zeigt in Blockschaltbildform die Werkzeugsteuerung gemäß der Erfindung. Das Eingangssignal, wie es zum Beispiel von der Schaltung 7 oder 7a oder sogar der Schaltung 8 gewonnen wird, ist ein Lagesignal, dargestellt bei 703, und zwar mittels einer Analogspannung oder eines Analogstroms, dargestellt bei  $A_u$ . Dieses Signal wird in eine Schaltung 725 eingespeist, die eine geeignete Transfer- oder Übertragungsfunktion hat, die abgebildet ist, um den Neigungswinkel  $\theta_u$  aus der relativen Verschiebung der beiden Sensoren  $A_u$  und dem Abstand  $L$  zwischen ihnen als Differenz aus der ursprünglichen Winkellage  $\theta_{u0}$  zu berechnen. Dieses Ergebnis ist ein Analogausgangssignal, das den Neigungswinkel der Tangentialebene darstellt und das über den Analog-Digital-Umsetzer 724d dem Stellmotor 725a zugeführt wird, der eine der Positionierungsbewegungen des Werkzeugs steuert. Der Rückkopplungsweg 725b stellt natürlich die Anfangsbedingung  $\theta_u$  für das nächste Steuerinkrement her, während das Eingangssignal  $L$  ein Koeffizienteneingangssignal ist, zum Beispiel über ein Koeffizientenpotentiometer, das eine Konstante des Systems



darstellt, zum Beispiel den Abstand zwischen zwei Abtastern, oder eine andere Variable, aus der der Neigungswinkel abgeleitet werden kann (vgl. Fig. 6). Um die Werkstücklagen zu steuern, wird der Neigungswinkel durch die üblichen geometrischen Beziehungen von Sinus und Cosinus im Block 725c in Ausgangssignale  $\Delta x$  und  $\Delta z$  umgewandelt, die ihrerseits in Impulsfolgen durch Analog-Digital-Umsetzer 725d und 725e umgesetzt werden, um Ausgangssignale zu erzeugen, die Werkzeugstellmotoren 725f und 725g steuern, die die Schlitten oder Wagen positionieren, damit der Bearbeitungsort entsprechend dem Grad der Neigung eingestellt wird.

In Fig. 10, 11 und 12 ist eine Kopiervorrichtung gemäß der Erfindung gezeigt. Genauer gesagt, die Vorrichtung hat ein Gestell 830 mit einem Ständer 830a und einer horizontalen Führung 830b für einen horizontalen Tisch 830c, der in Y-Richtung verschiebbar ist, wie am besten aus Fig. 11 ersichtlich ist, und zwar durch eine Leitspindelmechanik, die durch einen Stellmotor 830d angetrieben ist. Dieser Tisch trägt eine andere horizontale Plattform 831, die in X-Richtung (vgl. Fig. 10) senkrecht zur Bewegungsrichtung des Tisches 830c durch eine Leitspindelanordnung (nicht gezeigt) und einen Stellmotor 831a verschiebbar ist. Die horizontale Führung für die Plattform 831 ist eine V-Führung, wie bei 831b abgebildet ist, und entspricht der V-Führung 830b. Das Werkstück U und das Modell S können auf der Plattform 831 durch irgendeine übliche Einrichtung gehalten sein, zum Beispiel T-Nuten in der Plattform, verbunden durch Schraubgewinde mit dem Werkstück.

Ein weiterer Ständer 830e erstreckt sich vom Gestell nach oben, wie aus Fig. 10 ersichtlich ist. Der Ständer 830e bildet eine vertikale Führung, in der ein Abtasterschlitten 132 vertikal in Z-Richtung unter Steuerung durch eine Leitspindel 832a

verschiebbar ist, die schematisch abgebildet ist und durch einen Stellmotor 832b angetrieben ist. Der Schlitten 832 trägt einen horizontalen Arm 832c (Fig. 12), von dem der Abtaster 801 herabhängt. Wie in Verbindung mit Fig. 1 beschrieben ist, hat der Abtaster mehrere Abtastfinger 801a, 801b, 801c usw., die verschwenkbar an einer Platte 104 angelenkt sind, die tangential auf der konkaven Oberfläche des Modells S ruht. Wenn konvexe Oberflächen auftreten oder Formänderungen in der Oberfläche zu erfassen sind, wird der Kopf 801 durch den Abtastkopf 201 ersetzt, der in Verbindung mit Fig. 3 beschrieben worden ist. Die Ausgangssignale von den Differenztransformatoren können an die Steuerschaltung über den Arm 832c abgegeben werden, wobei eine Unterbringung im Gestell 830 in Frage kommt.

Parallel zum Ständer 830e ist der Ständer 830a, der den Werkzeugkopf trägt, mit einem vertikal verschiebbaren Schlitten 833 versehen, der in Z-Richtung durch eine Leitspindel 833a beweglich ist, die schematisch in Fig. 10 abgebildet ist, und zwar durch einen Motor 833b. Wie Fig. 11 zeigt, bildet der Schlitten 833 eine V-Führung 833c für einen Quervorschubschlitten 834, der durch eine Leitspindel 834 und einen Motor 834b in Y-Richtung angetrieben ist. Der Quervorschubtisch 834 bildet den Grundkörper eines Drehtisches 835, der um eine horizontale Achse  $H_c$  (Fig. 11) drehbar und durch einen Stellmotor 835a angetrieben ist, dessen Ritzel in eine Zahnkranz-Zahnstange eingreifen kann, die vom Drehtisch 835 getragen ist. Der Drehtisch trägt auch einen horizontalen Arm 836, der eine V-Führung 836a für einen Schlitten 836b trägt, der in X-Richtung (Fig. 11) hin- und herbewegt werden kann durch eine schematisch angedeutete Leitspindel 836c und einen Stellmotor 836d.

Der Schlitten 836b bildet ähnlich eine Unterlage für einen Drehtisch 837 mit äußerer Verzahnung, die von einem Ritzel von

einem Motor 837a um die horizontale Achse  $H_d$  angetrieben wird. Wie aus Fig. 11 ersichtlich ist, kann der Werkzeugkopf 808, der den Elektromotor tragen kann, der den Fräser R um die Achse  $V_a$  dreht, im Uhrzeigersinn oder Gegenuhreigersinn um die Achse  $H_d$  in der Zeichenebene von Fig. 11 verschwenkt werden, das heißt in der Ebene der Achse  $V_a$ . Durch Verschieben des Schlittens 836b auf dem Arm 836 und durch Anheben und Absenken des Arms über den Schlitten 833 ist es möglich, drei Freiheitsgrade der Bewegung vorzusehen, um das Werkzeug an irgendeinem Punkt auf der Oberfläche des Werkstücks W zu positionieren und auch die Werkzeugachse in dieser Ebene in eine Lage senkrecht zu einer Tangente an die Oberfläche in dieser Ebene zu verschwenken. Durch Drehen des Arms 836 ist es ferner möglich, die Achse  $V_a$  in der Zeichenebene von Fig. 10 zu verschwenken, das heißt um eine Achse senkrecht zur Achse  $V_a$  und auch senkrecht zur Achse  $H_d$ . Die horizontale Bewegung in diesem Fall wird durch den Schlitten 834 bewirkt. Die beiden zusätzlichen Freiheitsgrade gewährleisten, daß die Achse  $V_a$  senkrecht auf einer Tangente an die Werkstückoberfläche senkrecht zur Zeichenebene von Fig. 10 steht. Die Achse  $V_a$  steht dann senkrecht auf zwei zueinander senkrechten und sich schneidenden Tangenten am Bearbeitungsort, so daß sie senkrecht auf der gedachten Tangentialebene steht. Die Eingangssignale für die Stellmotoren 833b, 834b, 836d, 835a und 837a werden vom Abtaster gewonnen und wie oben beschrieben (Fig. 7 und 9) verarbeitet.

Eine andere Anordnung, die mindestens fünf Freiheitsgrade für die Bearbeitung des Werkstücks erlaubt, ist in Fig. 13 und 14 abgebildet. In diesem Ausführungsbeispiel bildet ein Gestell 930 eine horizontale V-Führung 930b für einen Tisch 930c, der durch einen Motor 930d angetrieben ist. Dieser Tisch bildet seinerseits eine V-Führung 931b für eine Plattform 931, die

durch einen Stellmotor 931a und eine andere Leitspindel in der horizontalen Richtung senkrecht zu der des Tisches 930c verschiebbar ist. Auch hier kann jeder Ort des Werkstücks W unterhalb des Werkzeugs T auf dieser längs- und querverschiebbaren Anordnung erreicht werden, wie sie in Werkzeugmaschinen allgemein üblich ist. Erfindungsgemäß bildet jedoch das Gestell 930 eine vertikale Führung 930a für einen vertikal beweglichen Schlitten 933, der durch einen Stellmotor 933e über eine Schnecke 933b' und ein Schneckenrad 933b'' angetrieben wird, das die Mutter für die ortsfeste Leitspindel 933a darstellt. Der vertikal bewegliche Schlitten 933 bildet ein Gehäuse für eine gekrümmte Zahnstange 938, deren Drehpunkt auf der Spitze des Werkzeugs T liegt, wobei die Zahnstange um eine horizontale Achse senkrecht zur Zeichenebene von Fig. 13 in diesem Mittelpunkt verschiebbar ist. Die Zahnstange 938 ist bei ihrer gekrümmten Bewegung durch Rollen 938a und 938b geführt und durch ein Ritzel 938c eines Stellmotors 938d angetrieben. Die Zahnstange trägt auch eine Lagerbuchse 938e, in der die Welle 936a eines Arms 936 für eine Drehung um eine horizontale Achse  $H_e$  gelagert ist, die sich unter einem rechten Winkel mit der Spitze des Werkzeugs T schneidet. Ein Stellmotor 935 ist vorhanden, um den Arm 936 zu drehen, der den Werkzeugkopf 908 mit seinem Elektromotor trägt. Die Achse des Werkzeugs T ist durch  $V_b$  dargestellt. In diesem Ausführungsbeispiel wird das Minimum von fünf Freiheitsgraden erzielt durch Kippen oder Verschwenken der Zahnstange 938, die die Achse  $V_b$  in irgendeinen Winkel  $\theta$  in der Zeichenebene von Fig. 14 verschwenken kann, durch die Drehung der Welle 936a, die die Achse  $V_b$  in irgendeinen Winkel  $\phi$  verschwenken kann, die vertikale Bewegung des Schlittens 932 und die beiden horizontalen Dimensionen der Bewegung, die durch den Tisch 930c und die Plattform 931 gewährleistet sind. Die Stellmotoren für diesen Antrieb können nach einem aufgezeichneten Programm betätigt werden, und zwar von irgendeiner Abtast-

anordnung wie in Verbindung mit Fig. 1, 3 und 10 bis 12 beschrieben ist, oder durch einen Abtastkopf gemäß Fig. 10 bis 12, der auf derselben Unterlage montiert ist. Es ist ersichtlich, daß durch einfaches Vertauschen des Werkzeugkopfs und des Werkstücks mit dem Abtastkopf und dem Modell die Konstruktion von Fig. 13 und 14 eine modellabtastende Anordnung als Alternative der vorher beschriebenen Ausführungsbeispiele ausbilden kann. Außerdem kann wahlweise der Bearbeitungskopf von Fig. 10 bis 12 durch das Kopf- und Steuersystem von Fig. 13 und 14 ersetzt werden.

In Fig. 15, 15A und 15B ist ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Kopiermaschine gemäß der Erfindung abgebildet, wobei diese Maschine grundsätzlich denselben Aufbau wie die von Fig. 13 und 14 hat. In diesem Ausführungsbeispiel trägt jedoch ein Gestell 1030 einen Tisch 1030c, der senkrecht zur Zeichenebene von Fig. 15 durch einen Stellmotor 103 verschiebar ist. Eine Plattform 1031 ist von diesem Tisch getragen und verschiebbar in der horizontalen Ebene, jedoch senkrecht zur Verschiebungsrichtung des Tisches 1030c durch einen Motor 1031a. Sowohl das Modell S als auch das Werkstück W können auf der Plattform 1031 montiert sein. Ein einzelner Schlitten 1030, der vertikal in einer Führung 1030a durch eine Leitspindel-anordnung 1033a usw., angetrieben durch einen Motor 1030b, verschiebbar ist, dient dazu, sowohl das Werkzeug T als auch den Abtaster 1001 zu tragen, die beide den Aufbau gemäß Fig. 3 haben können. Zu diesem Zweck ist die gekrümmte Zahnstange 1038 im Schlitten 1033 gehaltert (als Halterung kann die von Fig. 13 und 14 vorgesehen werden) und durch ein Ritzel 1038c eines Motors 1038d angetrieben. Die gekrümmte Zahnstange 1038 definiert eine Drehachse an der Schneide des Werkzeugs T. Die Zahnstange 1038 ist mit einer horizontalen Tragschiene 1038e ver-

sehen, die Lager für zwei Stangen 1036 und 1032 bildet, die in entsprechenden Lagerbuchsen des Trägers 1038e drehbar sind, wie durch einen Pfeil 1036a angedeutet ist. Der Antriebsmotor für diese Drehbewegung ist bei 1035a ähnlich Fig. 13 und 14 gezeigt.

In diesem Ausführungsbeispiel hat jedoch jeder der Köpfe 1040 und 1041 für den Abtaster bzw. das Werkstück einen Dreh- oder Revolverkopf 1040a bzw. 1041a, der um eine Achse  $T_3$  bzw.  $T_4$  drehbar ist, die unter einem Winkel zur Werkzeug- oder Abtasterachse liegt, jedoch damit koplanar ist. Ein Schrittmotor 1040b oder 1041b ist vorhanden, um die Revolverköpfe zu drehen, die Futter 1040c und 1041 c haben, um Abtaster unterschiedlicher Empfindlichkeit und Ausdehnung sowie Schneidwerkzeuge unterschiedlichen Durchmessers und unterschiedlicher Feinheit aufzunehmen. Der Antriebsmotor für die beiden Einrichtungen kann <sup>bei</sup> 1008 vorgesehen sein.

Im Ausführungsbeispiel von Fig. 15, 15A und 15B kann der Abtaster elektronisch mit dem Werkzeugkopf gekoppelt sein, wie vorher beschrieben worden ist, um den Arm 1038 oder den Arm 1036 je nach Bedarf zu drehen. Die dafür vorgesehene elektronische Ausrüstung ist bereits erläutert worden. Es können jedoch viele dieser elektronischen Bauteile eingespart werden, indem die Arme 1032 und 1036 für eine gemeinsame Drehung durch eine Verbindung 1042 gekuppelt werden, die über Drehgelenke wie bei 1042 a abgebildet mit jedem Arm verbunden sind. Da die horizontalen X- und Y-Koordinaten durch die gemeinsame Bewegung des Werkstücks W und des Modells S auf einem gemeinsamen Tisch bestimmt sind, die Drehung des Werkzeugs und des Abtasters um den Winkel  $\theta$  durch die gemeinsame Kupplung des Abtasters und des Werkzeugs mit der gekrümmten Zahnstange 1038,

der gemeinsame Drehwinkel  $\emptyset$  durch die Verbindung 1042 und die gemeinsame Anhebung Z durch die Verwendung eines einzigen Schlittens 1033, ist ersichtlich, daß der Abtaster nur servogesteuert zu werden braucht, um seine eigene senkrechte Lage in Bezug auf das Modell beizubehalten, wodurch die senkrechte Lage des Werkzeugs gewährleistet wird. In diesem Fall können die in Fig. 7, 7A und 8 gezeigten Verbindungen mit den Werkzeugstellmotoren weggelassen werden.

Eine ähnliche mechanische Kupplung ist in Fig. 16A und 16B zu sehen, wo ein einziges Modell M als Vorlage oder Muster für mehrere Werkstücke  $W_1$  und  $W_2$  ... verwendet wird. In diesem System bildet ein Gestell 1130 einen einzelnen horizontalen Tisch 1130c, der in horizontaler Richtung Y durch einen Stellmotor 1130d positioniert wird. Eine Plattform mit einer ausreichenden Länge, um alle Werkstücke und das Modell zu tragen, ist für eine Bewegung in X-Richtung auf dem Tisch 1130c gelagert, wie bei 1131 gezeigt ist. Ferner ist ein Stellmotor 1131a zur Verschiebung dieser Plattform zu sehen. Der Abtaster 1101 und die Werkzeuge 1108 sind hierbei durch ein Parallelogrammgestänge für eine gemeinsame Neigung in der Ebene der Achsen der Werkzeug- und Abtastköpfe verbunden. Der Abtastkopf 1101h ist an zwei Kuppelstangen 1143 und 1144 an getrennten Orten 1143a und 1143b auf der Abtasterachse angelenkt. Gemäß Fig. 16A können ähnliche Paare von Stangen an beiden Seiten jedes Kopfs vorgesehen sein. Gelenke oder Zapfen 1143a', 1143a'' und 1144b', 1144b'' verbinden ähnlich die parallelen Stangen 1143, 1144 mit den Werkzeugköpfen 1108h, die mit Elektromotoren zum Antrieb der Werkzeuge versehen sein können. Wenn die Stange 1143 nach rechts relativ zur Stange 1144 verschoben wird, werden also die Köpfe im Uhrzeigersinn um identische Winkel  $\emptyset$  verschwenkt. Eine ge-

meinsame vertikale Bewegung aller Köpfe wird gewährleistet durch einen Schlitten 1133, der in vertikaler Richtung durch einen Motor 1133b verschoben werden kann, zum Beispiel durch eine Leitspindelanordnung, wie sie in Verbindung mit Fig. 13 und 15 beschrieben ist. Der Schlitten 1133 ist mit einem horizontalen Arm 1133s versehen, von dem eine Gabel 1133t sich nach oben erstreckt, um das Antriebsgestänge zu tragen. Die Gabel nimmt den Stellmotor 1135 auf, der auf ein Verbindungsglied 1145 einwirkt, das durch Hebel 1145a und 1145b der Stangen 1142 und 1144 in einem Kniegelenk verbunden ist, das durch eine Feder 1145c in die abgebildete Mittelstellung vorgespannt ist. Wenn der Motor 1135 betätigt wird, werden also die Köpfe gemeinsam zur einen oder anderen Seite geneigt. Das gesamte Gestänge ist von einer Welle 1146 getragen, die zwischen den Armen der Gabel 1133t um die Achse  $H_f$  drehbar gelagert ist, so daß die gesamte Einheit um den Winkel  $\theta$  im Uhrzeigersinn oder Gegen- uhrzeigersinn verschwenkt werden kann, wie in Fig. 16B gezeigt ist. In diesem Ausführungsbeispiel ebenso wie in dem von Fig. 15 und 15A reicht die Servosteuerung der Lage des Abtasters aus, um das Werkzeug zu positionieren.

In der Anordnung von Fig. 17 und 18A ist der Abtastkopf 1201 auf einem Arm 1232 montiert, der drehbar von einer Stange 1246 aufgenommen ist und durch seinen Stellmotor wie bereits beschrieben angetrieben wird. Der Abtastkopf 1201 ist außerdem durch ein Verbindungsglied 1243 mit Köpfen 1203 von mehreren Bearbeitungsstationen verbunden, die jeweils durch ihren eigenen Arm 1236 getragen sind. Ein Verschwenken des Abtasters um die Achse seiner Stange 1232 im Uhrzeiger- oder Gegen- uhrzeigersinn zur Einstellung des Neigungswinkels  $\theta$  führt daher zu einer entsprechenden Neigung der Bearbeitungsköpfe.



Die Stange 1246 ist außerdem für eine Drehung um die horizontale Achse  $H_g$  in Ständern 1233 an jedem Ende der Maschine gelagert, wobei letztere vertikal verschiebbar auf entsprechende Schlitten angeordnet sind, die durch den Motor 1233b angetrieben werden können. Die Ständer 1233 sorgen also für eine vertikale Verschiebung Z. Wie in den bisher beschriebenen Ausführungsbeispielen werden das Modell S und die Werkstücke  $W_1$ ,  $W_2$  usw. von einer Plattform 1231 getragen, die in der Y-Richtung durch einen Stellmotor 1231a verschiebbar ist, während ein darunter liegender Tisch 1230c in Pfeilrichtung X über einen anderen Stellmotor (nicht gezeigt) verschiebbar ist. Die einzelnen Köpfe können jedoch um entsprechende Achsen  $H_1$  drehbar sein, wie in Fig. 7A gezeigt ist, falls es gewünscht ist, in welchem Fall ein weiteres Verbindungsglied die Köpfe miteinander getrennt von dem Verbindungsglied 1243 kuppelt, das die entsprechenden Arme an Gelenken (zum Beispiel Kugelgelenken) verbindet. Jede der Kopfanordnungen von Fig. 16A, 16B, 17 und 17A können diejenige von Fig. 13 bis 15 ersetzen und umgekehrt, wenn ein mechanisch gesteuertes Kopieren erwünscht ist. Ferner können die Verbindungsglieder von Fig. 15 und 17A weggelassen werden, wenn ein unabhängiges, jedoch elektronisch gesteuertes Kopieren erforderlich ist, gemäß den für Fig. 10 bis 14 angegebenen Merkmalen.

In Fig. 18 bis 18E ist eine Anzahl von Abwandlungen für die Halterung des Werkzeugkopfs gemäß der Erfindung gezeigt. Zum Beispiel trägt in Fig. 18 ein Gestell 1330 einen Tisch 1330c, der in Pfeilrichtung Z durch einen Stellmotor 1330d verschiebbar ist. Der Tisch 1330c trägt seinerseits eine horizontal verschiebbare Plattform 1331, die in Pfeilrichtung X über einen Stellmotor 1331a verschiebbar ist. In diesem System trägt jedoch die Plattform 1331 einen Drehtisch 1349, der von in m

Motor 1349a so angetrieben ist, daß das Werkstück W um die vertikale Achse  $V_f$  drehbar ist. Der Ständer 1330a des Gestells trägt einen Schlitten 1333, der in vertikaler Richtung durch einen Motor 1333b und eine geeignete Leitspindel-anordnung verschiebbar ist. Ein horizontaler Querschlitten 1334 wird durch einen Motor 1334a angetrieben. Ein aufwärts geneigter Arm 1334b trägt eine Lagereinheit 1334c, in der eine Welle 1334b einer weiteren Drehtischanordnung 1335 drehbar aufgenommen ist. Der Drehtisch 1335 kann um die geneigte Achse  $I_1$  angetrieben werden, die die vertikale Achse  $V_f$  am Bearbeitungs-ort schneidet. Der Schlitten, der durch den Stellmotor 1335a gedreht wird, ist mit einer gekrümmten Zahnstange 1336 versehen, durch die der Bearbeitungskopf 1308 über einen Stellmotor 1336a kippbar ist. Anders ausgedrückt, zwei Freiheitsgrade der Drehung in aufeinander senkrechten Ebenen sind in diesem Kopf außerdem vorgesehen. Das System von Fig. 18B unterscheidet sich von dem in Fig. 18 darin, daß ein Schlitten 1434 einen horizontalen Arm 1434b trägt, der durch einen Stellmotor 1434a um die Achse  $H_g$  drehbar ist. Der Arm 1436, der vom Arm 1434b ausgeht, ist durch einen Stellmotor 1436a drehbar, um den Schneidkopf 1408 um den Winkel  $\theta$  um seine Achse  $H_k$  zu verschwenken. Das Werkstück W ist um die vertikale Achse  $V_g$  auf einem Drehtisch 1449 drehbar.

Fig. 18D und 18E zeigen ein weiteres Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung, wobei die Merkmale von Fig. 18 und 18A zusammen mit einigen Merkmalen von 18B und 18C verwendet werden. Im Ausführungsbeispiel von Fig. 18D und 18E ist das Werkstück W auf einem Drehtisch 1549 gelagert, der durch einen Motor 1549a angetrieben werden kann, wobei der Drehtisch 1549 auf einer Längsvorschubplattform und einem Quervorschubtisch in der in den vorhergehenden Figuren angedeuteten Weise gelagert ist und wobei diese X-Y-Einheit mit 1531 be-

zeichnet ist. Ein Arm 1534b ist hier in einem Lager 1535a für eine Drehung um die geneigte Achse  $I_2$  durch einen Motor 1535a' gelagert. Der Arm 1534b ist außerdem gekröpft, wie Fig. 18E zeigt, und trägt einen kurbelartigen Arm 1536, der durch einen Stellmotor 1536a drehbar ist und einen Kopf 1508 trägt. Um eine vertikale Bewegung zu erlauben, ist die Lagerbuchse 1535a auf einem vertikal verschiebbaren Schlitten 1533 montiert, der seinerseits von einem horizontal verschiebbaren Schlitten 1534 getragen ist. Obwohl die Systeme von Fig. 18 bis 18E dieselben entsprechenden Stellmotoren haben können, die durch elektronische Impulse angesteuert werden, wie sie zum Beispiel durch die Schaltungen von Fig. 7 bis 9 erzeugt werden, können sie auch mechanisch mit dem entsprechenden Abtaster gekuppelt oder für einen Gleichlauf verbunden sein auf einem Werkstückauflagetisch, wie er in Verbindung mit Fig. 17 und 17A beschrieben ist.

Fig. 19 zeigt eine weitere Abwandlung der Werkzeug- oder Elektrodenhalterung gemäß der Erfindung. In diesem Fall ist ein Kopf 1608 auf einer Welle 1636 montiert, die drehbar ist um eine Achse  $I_3$  durch einen Stellmotor 1636a oder ein Verbindungsglied, das eine Anzahl derartiger Einheiten miteinander verbindet (vgl. Fig. 15, 15A und 15B). Ein Lager 1635a, innerhalb dem eine Welle 1636 gelagert ist, ist von einem gekröpften Arm 1635 frei tragend, der in einer vertikal verschiebbaren Säule 1633 montiert ist, und die Achse  $H_m$  durch einen Stellmotor 1635b verschwenkbar. Außerdem hat die Vorrichtung einen Verbundtisch 1631, der in der X- und Y-Richtung durch Stellmotoren 1631a und 1631b anreibbar ist. Es versteht sich, daß der Kopf von Fig. 19 dieselben Bewegungsmöglichkeiten hat und in derselben Weise betätigbar ist wie die in Fig. 18 bis 18E abgebildeten Systeme.

BAD ORIGINAL

209837/0772

Fig. 20 und 20A zeigen ein weiteres System zur Erreichung von zwei Rotationsfreiheitsgraden für einen Motor-enthaltenden Werkzeugkopf 1708, der zum Werkstück W benachbart ist. In diesem Fall ist der Werkzeugkopf 1708 am Ende eines gekröpften Arms 1736 freitragend, dessen Rotationsachse  $H_n$  die Werkzeugachse  $T_h$  im Bearbeitungspunkt  $F_h$  auf der Werkstückoberfläche schneidet. Die Kurbel 1736 kann durch einen Stellmotor 1736a verschwenkt werden und ist in einem Lager 1735a einer vertikal verschiebbaren Säule 1733 gelagert, die in der Z-Richtung durch einen Stellmotor 1733a beweglich ist. Der Stellmotor 1733a und die vertikal verschiebbare Auflage 1733 sind von einem Schwenkarm 1735 getragen, der um die Werkstückachse auf einer Welle 1749 durch einen Stellmotor 1735b verschwenkbar ist. Der Arm 1735 ist um eine vertikale Achse verschwenkbar und in einer Unterlage 1730 unterhalb des Arbeitstisches montiert. Der letztere besteht mindestens aus einem Tisch 1730c, der durch einen Stellmotor 1730d in der Y-Richtung verschiebbar ist, und trägt eine Plattform 1731, die in der X-Richtung durch einen Stellmotor 1731a verschiebbar ist. Auch hier hat das Werkzeug zwei Freiheitsgrade der Drehung und der Translationsbewegung auf der Z-Achse.

Wie bereits erwähnt wurde, ist ein wichtiges Merkmal der Erfindung die Verwendung des Systems für die Fertigbearbeitung oder Oberflächenveredlung eines Werkstücks mit vorbestimmter Form. Eine Vorrichtung für diesen Zweck ist in Fig. 21 und 21A abgebildet. In Fig. 21 ist ein Gehäuse 50 zu sehen, das mit einer Saugpumpe über eine Leitung 150 verbunden ist, aus der ein Hochdruckfluid und Teilchen oder Gase evakuiert werden. Das "Werkzeug" in diesem Fall ist eine Düse 58, die auf einem Halter 57 mit einer Einrichtung, zum Beispiel einem Stellantrieb oder einer Handsteuerung 56, zur Einstellung des Ab-

stands zwischen der Düse 58 und dem Werkstück W versehen ist, das hier schematisch als Elektrode für Elektroentladungs- oder elektrochemische Bearbeitung gezeigt ist. Die Düse ist vorzugsweise senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet, die fertigbearbeitet werden soll, und für diesen Zweck kann eines der vorher in Fig. 1 bis 20 gezeigten Systeme benutzt werden. Eine vereinfachte Kopfmontage- und Abtasteranordnung ist hier gezeigt, um die grundlegenden Unterschiede zwischen der Kopierfertigbearbeitungsvorrichtung und Vorrichtungen herauszustellen, die andere mechanische materialentfernende Techniken benutzen. Das Gehäuse 50 ist mit einer aufklappbaren transparenten Klappe 50a. bedeckt, und ist mit Durchführungsisolatoren 50b und 50c versehen, durch die Drähte 55 zum Werkstück W und zur Düse 58 von einer elektrochemischen Bearbeitungsquelle 54 führen. Letztere kann den Schaltungsaufbau von irgendeiner der ECM-Stromversorgungen haben, die in den eingangs erwähnten Patentschriften beschrieben sind, sofern sich diese mit der elektrochemischen Bearbeitung beschäftigen. Eine Pumpe 53, die durch einen Motor 52 angetrieben ist, drückt einen Elektrolyten unter hohem Druck durch einen Schlauch 59 in diese Düse 58, die auch mit einem Luftstrahl über ein Rohr 60 von einem geeigneten Kompressor beaufschlagt wird. Die Abriebteilchen können in den Luftstrom von einem Trichter 61 über ein Dosierabsperrorgan 62 oder in die Flüssigkeitsleitung von einem Trichter 63 und einem Dosierabsperrorgan 64 dosiert werden. Im Ausführungsbeispiel von Fig. 21 ist das Muster oder Modell S auf einem Tisch 70 gelagert, der in X- und Y-Richtung verschoben werden kann, wie oben erläutert wurde. Ein Abtaster oder Fühler 69 ist nach unten gerichtet, um die Oberfläche des Modells über einen Zahnstangenantrieb 68 abzutasten, wobei ein Stellmotor gebildet ist, der durch die Schaltungen von Fig. 7 oder 7A betätigbar ist. In diesem Fall ist die Düse 58 mit dem Abtaster 69 über eine Stange 67 für eine gemeinsame Bewegung

mit dem Abtaster gekuppelt, obwohl unabhängige Stellmotoren für die Düse vorgesehen sein können, wie anhand von Fig. 18 bis 20 beschrieben wurde. Der Quervorschub des Abtasters 69 wird durch zwei Schienen 66 erreicht, die eine Zahnstange aufweisen, in die ein Ritzel eines Quervorschub-Stellmotors 65 eingreift. Der Stellmotor 65 ermöglicht eine Bewegung des Abtasters und der Düse in der X-Richtung. Die Bewegung in der Y-Richtung wird durch zwei Schienen 71 gewährleistet, die senkrecht zur Zeichenebene verlaufen, jedoch mit einem Stellmotor 72 zusammenarbeiten, um den Abtaster und die Düse auch in dieser Richtung zu verschieben.

Eine Dosierpumpe 73, die durch einen Motor 74 angetrieben ist, saugt Fluid aus einem Behälterbecken 75 unterhalb des Werkstücks W ab und fördert es in eine Pumpe 53. Der Betrieb des Systems von Fig. 21 wird noch deutlicher aus dem jetzt zu erläuternden speziellen Ausführungsbeispiel ersichtlich werden.

In Fig. 21A ist eine Abwandlung des Systems von Fig. 21 gezeigt, wobei ein Werkstückgehäuse 150 auf einer Plattform 131 montiert ist, die in der X-Richtung durch eine Leitspindelordnung verschiebbar ist, die durch einen Stellmotor 131a angetrieben ist. Das Muster oder Modell S und das Werkstück W sind so vom selben Tisch getragen, und eine Anzahl von Düsenköpfen und Werkstücken können gleichlaufend gekuppelt sein, wie in Zusammenhang mit Fig. 17 und 17A beschrieben ist.

Ein Grundkörper 130 der Vorrichtung hat eine ortsfeste Leitspindel 133a (vgl. Fig. 13 und 14), auf der ein Schlitten 133 vertikal verschiebbar (in Z-Richtung) durch einen Stellmotor 133b ist. Der Schlitten 133 trägt eine gekrümmte Zahnstange 132, wobei eine Querstange 133a mit Lagern für entsprechende gekrüpfte Arme 136 und 132 versehen ist, die

einen Abtaster oder Fühler 101 bzw. eine Düse 108 tragen. Wie aus Fig. 15, 15A und 15B ersichtlich ist, sind die Arme 136 und 132 durch eine Stange 142 und die üblichen Gelenke verbunden. Die Werkzeugdüse und der Abtaster können also dieselben Bewegungsarten durchführen, wie in Zusammenhang mit Fig. 13, 14, 15 und 15A beschrieben ist.

Die Plattform 131 ist von einem Tisch 130 c getragen, der in horizontaler Richtung senkrecht zur Richtung der Verschiebung der Plattform 131 durch den Stellmotor 130d verschiebbar ist. Der Abtaster 101 hat hier den Aufbau von Fig. 1 oder 3 und ist mit den Schaltungen von Fig. 7 bis 9 versehen, um die Orthogonalität zwischen der Düse 108 und dem Werkstück zu unterhalten.

Ein Ablauf 175 vom Gehäuse 150 leitet die Flüssigkeit in eine Vorpumpe 173, die von einem Motor 174 angetrieben ist und eine Hochdruckpumpe 153 speist. Die letztere ist durch ihren Motor 152 angetrieben, um die Flüssigkeit in die Düse über eine Leitung 159 einzuleiten. Luft wird über eine Leitung 160 zugeführt, und Einfüllleinrichtungen 61 bis 64 können verwendet werden, um Teilchen dem System zuzusetzen. Das Verschwenken der Zahnstange 138 wird durch einen Stellmotor 138d vorgenommen. Das Gehäuse 150 hat einen Auslaß 151 zum Absaugen von Abgasen, festen Teilchen und Tropfen aus dem System.

In Fig. 22 ist ein System zur Erzeugung von Kopien oder Vervielfältigungsstücken, insbesondere eines oder mehrerer Formwerkzeuge, gezeigt, wobei die oben angeführten Erfindungsmerkmale angewendet sind. In einer ersten Stufe 1 wird eine Zeichnung des gewünschten Erzeugnisses gefertigt in üblicher Weise, und ein negatives Modell davon kann aus irgendeinem

BAD ORIGINAL

209837/0772

geeigneten Material hergestellt werden, zum Beispiel Holz, Gips oder einem anderen Werkstoff, der sich wenig als Elektrodenmaterial eignet. Das Modell wird dann in eine Kopierfräsmaschine 2 der in Zusammenhang mit Fig. 1 bis 20 beschriebenen Art eingespannt, der ein Block aus Elektrodenmaterial, zum Beispiel Graphit, als Werkstück zugeführt wird. In dieser Stufe wird der Elektrodenblock zweckmäßigerweise zunächst grob geformt durch Verwendung einer geeigneten Schneide des Fräasers, um das Modell in üblicher dreidimensionaler Weise zu kopieren, und dann mit einem Fertigbearbeitungswerkzeug fertigbearbeitet, wobei die Werkzeugachse immer senkrecht auf der Oberfläche gehalten wird, wie vorher ausführlich erläutert wurde, so daß die resultierende Oberfläche praktisch frei von irgendwelchen Kratzern ist, die sonst üblicherweise in zeitraubender Fertigbearbeitung von Hand entfernt werden müßten. Wenn das Modell aus dem Elektrodenmaterial reproduziert worden ist, wird die Elektrode automatisch (unter Steuerung eines Programmgebers 7) durch einen Förderer 11a zu einer Elektrodenkontrollstation 3 transportiert, in der die Elektrode und das Modell verglichen und die Abmessungen in einen Rechner 8 eingespeist werden, der die Elektrode zurückweisen oder eine Fortsetzung des Programms oder der Folgesteuerung erlauben kann. Die zurückgewiesene Elektrode kann von Hand fertigbearbeitet werden, falls es möglich ist, und Daten der Bearbeitungsparameter, die zur zurückgewiesenen Elektrode führten, werden dann vorteilhafterweise verwendet, um die Bearbeitungsparameter zu korrigieren. Die Form des Modells wird dann selbstverständlich im Rechner für nachfolgende Verwendung gespeichert. Eine Elektrode mit befriedigenden Abmessungen wird automatisch bei 11b zum Beispiel zu einer elektrischen Grobformgebungsvorrichtung weitergeschaltet, die schematisch bei 4 dargestellt ist und vom ECM- oder EDM-Typ ist. Eine derartige Vorrichtung ist in den eingangs genannten Patentschriften beschrieben. Eine weitere elektrische



Bearbeitungsstufe 5 vom EDM-Fertigbearbeitungstyp kann das Werkstück aufnehmen, das zur Stufe 4 transportiert wird, wie durch einen Block 10 angedeutet ist, und das aus Stahl oder dergleichen bestehen kann, wobei ein Förderer 11c für den Werkstückvorschub vorgesehen ist. Vor einer elektrischen Bearbeitung kann das Werkstück mechanisch grob bearbeitet und dann gehärtet werden. Nach der Fertigbearbeitungsstufe 5 wird das Erzeugnis automatisch in einem weiteren Schritt bei 11d zu einer Kopiefertigbearbeitungs- oder Fluidhonvorrichtung 6a transportiert, in der eine Oberfläche hoher Güte unter Steuerung durch das Ausgangsmodell oder rechnergespeicherte Information erzeugt wird, während bisher dafür eine Handfertigbearbeitung vorgesehen wurde, wonach das Werkstück bei 11d' zu einer Erzeugniskontrollstation 3' transportiert wird. Hier werden die Abmessungen und die Form des Erzeugnisses mit der rechnergespeicherten Information bei 8 verglichen und gewünschtenfalls wird das Modell erneut verwendet, wie bei 11f dargestellt ist, oder eine Abänderung der Information zur Steuerung des Systems in einer Rückkopplungsschleife vorgenommen. Das Erzeugnis wird dann automatisch vom System durch einen Förderer 11e abtransportiert und bei 6 als ein Formwerkzeug erhalten, das komplementär zum ursprünglichen Modell und der Elektrode ist.

Die elektrischen Bearbeitungsstufen 4 und 5 erfordern eine Anzahl von Elektroden, nämlich eine Grobbearbeitungselektrode, eine Fertigbearbeitungselektrode, eine Zwischenbearbeitungselektrode usw. Es ist ersichtlich, daß derartige Elektroden mit entweder identischen oder verschiedenen Abmessungen leicht mit der Kopierfräsmaschine 3 nach einem gemeinsamen Modell oder einer gemeinsamen Zeichnung gefertigt werden können, oder nach getrennten ähnlichen Modellen oder Zeichnungen, wobei dann eine Kontrolle in der Stufe 3 stattfindet.

Die elektrischen Bearbeitungsstufen 4 und 5 können zweckmäßigerweise mit einer gemeinsamen Vorrichtung durchgeführt werden, zum Beispiel mit einer EDM-Vorrichtung, insbesondere von einem solchen Typ, der sehr vielseitig in den Bearbeitungsmöglichkeiten ist und vorzugsweise ein automatisches Parameterumschaltssystem und einen automatischen Elektrodenwechsler hat, so daß, sobald ein Werkstückblock empfangen worden ist, die Vorrichtung mehrere Bearbeitungsschritte automatisch oder im wesentlichen ohne Eingreifen des Bedieners vornehmen kann und ein entsprechend elektrisch bearbeitetes Werkstück ausstößt.

Wenn die Elektrode, die zum elektrischen Formen eines Formwerkzeugs in den Stufen 4 und 5 erforderlich ist, eine konkave Oberfläche aufweist, was nicht ein zufriedenstellendes Formgeben durch ein entsprechendes Schneidwerkzeug oder Schneidwerkzeuge mit der Kopierfräsmaschine gemäß der Erfindung in der Stufe 2 gestattet, wird das Modell in geeignet bezeichnete Abschnitte unterteilt, die einzeln durch im wesentlichen konvexe Flächen gebildet sind, wobei jeder der Elektrodenabschnitte aus dem entsprechenden der unterteilten Modelle gefertigt wird, indem die Fräsmaschine in derselben Weise wie oben beschrieben benutzt wird. Kopiegeformte Elektrodenteile können dann in einem Magazin oder einer Speichereinheit einer automatischen Werkzeugwechseleinheit der EDM- oder ECM-Vorrichtung wie oben erwähnt installiert und in der Vorrichtung in einer geeigneten Folge verwendet werden, um fortschreitend das Werkstück in eine erforderliche Form zu bearbeiten, komplementär zum Modell, das die unterteilten Elektroden zusammen bilden.

Es seien nun einige Meßwerte wiedergegeben, die bei der praktischen Erprobung der Erfindung gewonnen wurden:

Ein Werkstück, bestehend aus 0,55 % Kohlenstoffstahl (S55C), wurde mit einer EDM-Graphitelektrode unter Verwendung von Kerosin als Bearbeitungsflüssigkeit bearbeitet. Die EDM-Einschaltzeit betrug 240  $\mu$ s und die Ausschaltzeit 12  $\mu$ s. Der Spitzenwert des Bearbeitungsstroms betrug 40 A. Die Oberflächenrauheit des Erzeugnisses betrug 11  $\mu$ m  $H_{max}$ . Die hier angegebenen Rauheitsabmessungen zeigen die maximale Höhe von Abschnitten der Oberfläche benachbart zu niedrigen Punkten in  $\mu$ m an. Ein ähnlicher Körper, der von Hand geformt wurde, hatte eine Rauheit von 25  $\mu$ m  $H_{max}$  und erforderte 16 h manueller Bearbeitung, um die Rauheit auf 3  $\mu$ m  $H_{max}$  zu reduzieren.

Nach einer Bearbeitung bis zur Erreichung einer Rauheit von 11  $\mu$ m  $H_{max}$  durch EDM, wie oben erwähnt wurde, wurde die Oberfläche des Körpers sandgestrahlt unter Verwendung eines Luftdrucks von 5,5 kp/cm<sup>2</sup> und von Siliziumkarbidteilchen mit Abmessungen entsprechend einer US-Siebnummer von 180 (ungefähr 0,084 mm Durchmesser). Die Oberflächenrauheit wurde dadurch auf im besten Fall 4 bis 8  $\mu$ m  $H_{max}$  reduziert bei Verwendung der in Fig. 21 oder 21A abgebildeten Vorrichtung mit einer 3 mm-Durchmesser-Düse, die einige mm vom Werkstück entfernt und senkrecht dazu angeordnet war, während bei Verwendung von Wasser mit 15 % Natriumnitrat und einem Druck von 30 kp/cm<sup>2</sup> die Oberflächenrauheit auf 3,5  $\mu$ m verringert wurde. Mit einem System, das ECM-Strom von 2,2 A und einem Potential von 40 V sowie Siliziumkarbid und Luft verwendete, konnte die Oberflächenrauheit auf 1,5  $\mu$ m  $H_{max}$  verringert werden. Beim Verschwenken der Düse aus der Senkrechten auf der Oberfläche um 2° stieg die Rauheit um das Dreifache an.

BAD ORIGINAL

209837/0772

Patentansprüche

①. Verfahren zur Formgebung eines Werkstücks, insbesondere eines Formwerkzeugs, dadurch gekennzeichnet,

- a) daß ein Modell mit den Soll-Abmessungen und der Form des fertigen Werkstücks erzeugt wird;
- b) daß die Oberflächenform und -abmessungen des Modells abgetastet werden ; und
- c) daß Material von einem Werkstückkörper mit einem Werkzeug gemäß der abgetasteten Form und gemäß den abgetasteten Abmessungen entfernt wird, während das Werkzeug senkrecht zur Werkstückkörper-Oberfläche gehalten wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Körper aus Elektrodenmaterial gefertigt wird, dadurch gekennzeichnet,

- d) daß ein leitendes Material mit dem im Verfahrensschritt (c) geformten Körper elektrisch bearbeitet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,

- e) daß das durch elektrische Bearbeitung im Verfahrensschritt d) geformte Material zum Fertigbearbeiten fluid- oder hydrogeholt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrische Bearbeitung im Verfahrensschritt d) durch Elektroentladungsbearbeitung vorgenommen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die

elektrische Bearbeitung im Verfahrensschritt d) durch elektrochemische Bearbeitung vorgenommen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet,

f) daß automatisch der gemäß dem Verfahrensschritt c) geformte Körper zu einer elektrischen Bearbeitungsvorrichtung transportiert wird, um den Verfahrensschritt d) durchzuführen, wobei die Bearbeitungsvorgänge der Verfahrensschritte c) und d) in einem vorbestimmten Zeitablauf nacheinander vor sich gehen.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der im Verfahrensschritt c) erzeugte Körper und das im Verfahrensschritt d) elektrisch bearbeitete Material kontrolliert und mit dem Modell verglichen werden.

8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

einen Abtaster oder Fühler zum Abtasten eines Modells und zum Erzeugen von mehreren Signalen, die eine Tangentialebene an die Oberfläche des Modells und die Krümmungsrichtung der Oberfläche im abgetasteten Punkt definieren;

einen Werkstückhalter zur Aufnahme des Werkstücks;

ein Werkzeug mit einer Achse, das in der Nähe des Werkstücks angeordnet ist;

einen Werkzeughalter; und

eine Einrichtung, die mit mindestens einem der Halter verbunden und wirkungsmäßig verbunden ist mit dem Abtaster zur Relativbewegung des Werkstücks und des Werkzeugs relativ zu mehreren Achsen, um die Werkzeugachse senkrecht zu durch das Werkzeug geformten Oberfläche des Werkstücks zu halten.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Abtaster aufweist mehrere Finger (102, 105a, 105b, 105c, 105d), die in Richtung des Modells (104a) vorgespannt sind, entsprechende mechano-elektrische Meßumformer (103) zur Umformung der Lage jedes Fingers in ein elektrisches Analogsignal entsprechend der Lage, wobei die Meßumformer mit mindestens einem der Halter gekoppelt sind, die auf die Analogsignale ansprechende Stellmotoren haben.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch Analog-Digital-Umsetzer zwischen den Meßumformern und den entsprechenden Stellmotoren für deren Schrittschalten in Abhängigkeit von den zugehörigen Analogsignalen.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkzeughalter aufweist ein das Werkzeug tragendes Glied und um eine Achse durch einen der Stellmotoren verschwenkbar ist, und daß ein entsprechendes Netzwerk (vgl. Fig. 9) mit trigonometrischer Übertragungsfunktion zwischen mindestens zweien der Meßumformer und dem einen der Stellmotoren vorgesehen ist, um diesen in Abhängigkeit von einer durch die entsprechenden Finger dargestellten Winkellage zu betätigen.

12. Vorrichtung nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine Platte (104), die tangential an das Modell (5) anlegbar ist und an den Fingern (105a bis 105d) angreift.

13. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Finger (105a bis 105d) ein mittleres Abtastglied (102) umgeben, das ein Ausgangssignal entsprechend der Krümmungsrichtung der Modelloberfläche erzeugt, an dem die Finger angreifen.

14. Vorrichtung nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (105e, 105f) zur pneumatischen Vorspannung jedes Fingers (105a bis 105d) in Richtung zum Modell (S).

15. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkzeughalter aufweist einen Schlitten (833), der linear in einer Richtung relativ zu dem Werkstück W verschiebbar ist, einen ersten Arm (836), der an dem Schlitten um eine Achse ( $H_c$ ) senkrecht zu dessen Verschiebeachse (Z) drehbar ist, und einen zweiten Arm (808), der an dem ersten Arm zur Drehung um eine Achse ( $H_d$ ) senkrecht zur Drehachse des ersten Arms gelagert ist, wobei das Werkzeug (T) am zweiten Arm mit seiner Achse im wesentlichen koplanar zur Drehachse des zweiten Arms montiert ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, gekennzeichnet durch starre Verbindungsglieder (1042), die zwischen dem Abtasterhalter und dem Werkzeughalter für deren gemeinsame Verschiebung angelenkt sind.

17. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkstückhalter einen Tisch (1031) hat, der sowohl das Modell (S) als auch das Werkstück (W) trägt, sowie eine Einrichtung zur Verschiebung des Modells in zwei aufeinander senkrechten linearen Richtungen.

18. Vorrichtung nach Anspruch 8, gekennzeichnet durch eine Antriebseinrichtung für die Drehung des Werkstücks (W) um die Achse des Werkzeugs (T).

19. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Werkzeug ein Fräser ist.

BAD ORIGINAL

209837/0772

20. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Werkzeug eine Düse (58) ist, die einen Fluid- oder Hydrohonstrahl auf das Werkstück (W) richtet.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, gekennzeichnet durch eine Stromquelle (54) für elektrochemische Bearbeitung, die zwischen dem Werkstück (W) und der Düse (58) liegt.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (60) zum Zwangsdurchsatz von Druckluft durch die Düse (53).

23. Verfahren zur Fertigbearbeitung einer bearbeiteten Oberfläche, dadurch gekennzeichnet, daß im wesentlichen senkrecht auf die Oberfläche ein Fluidstrahl gerichtet wird, wobei dem Fluid ein Elektrolyt und Abriehteilchen zugesetzt werden.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß Gas in das Fluid eingeblasen wird, und daß ein im wesentlichen einsinniges elektrisches Potential zwischen der Oberfläche und einer dazu senkrecht angeordneten benachbarten Düse angelegt wird, wobei als Elektrolyt eine Flüssigkeit verwendet wird.



48

Leerseite

FIG. 1

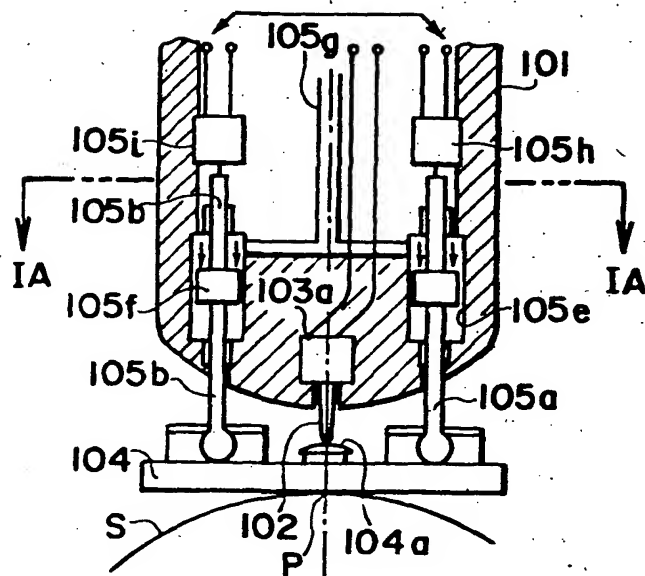


FIG. 1B

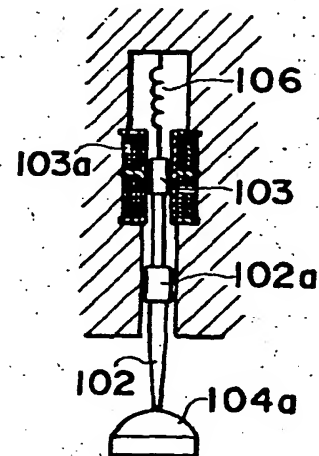


FIG. 1A

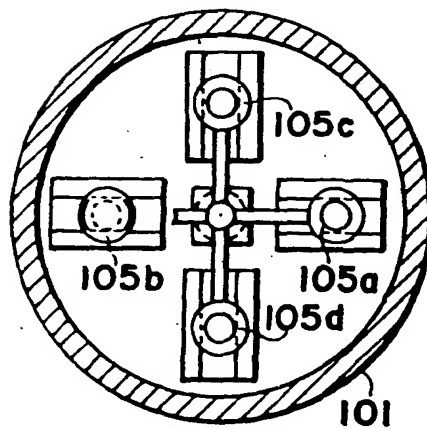


FIG. 3

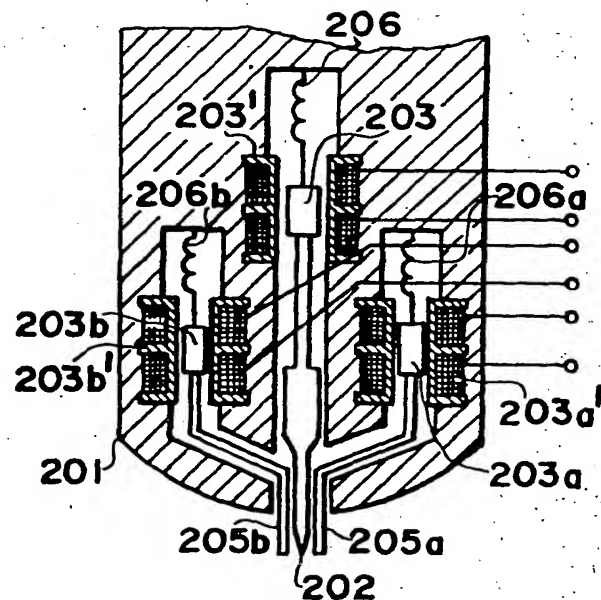
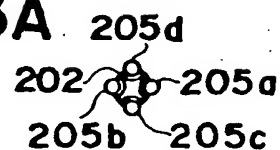
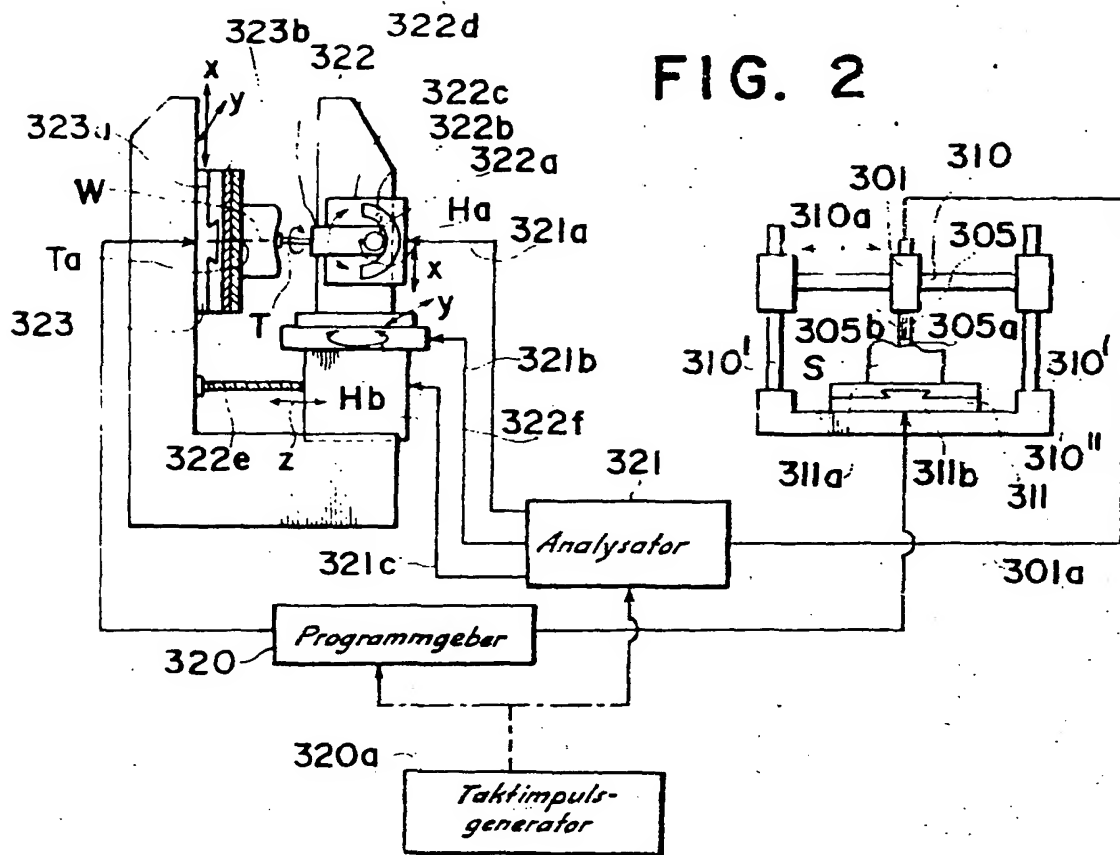
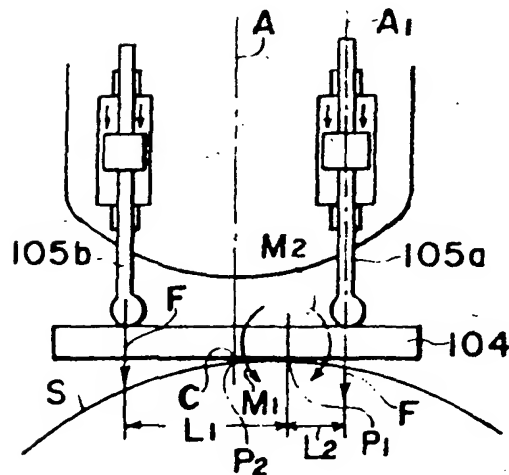


FIG. 3A

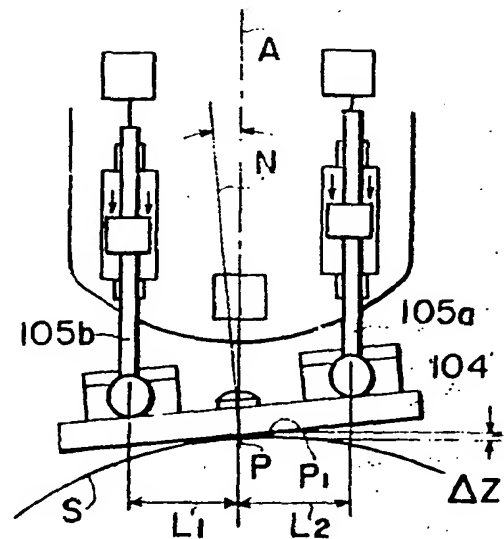




**FIG. 4**



**FIG. 5**



50

FIG. 6

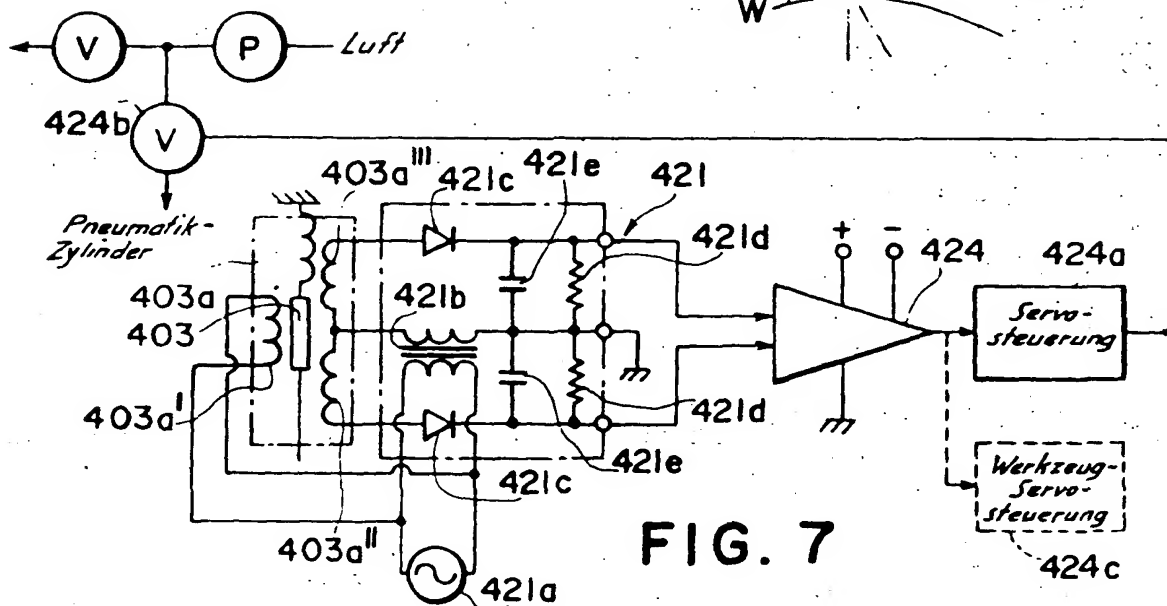
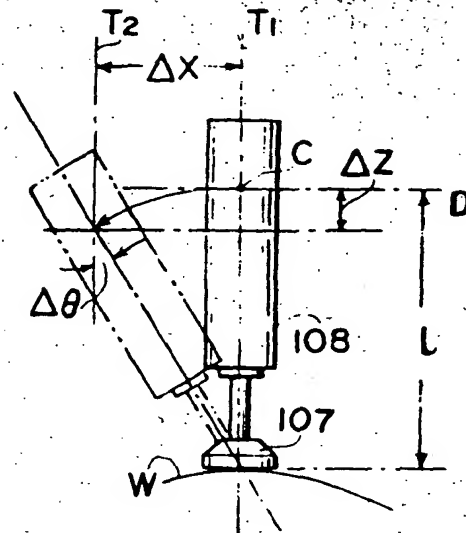


FIG. 7

FIG. 7A

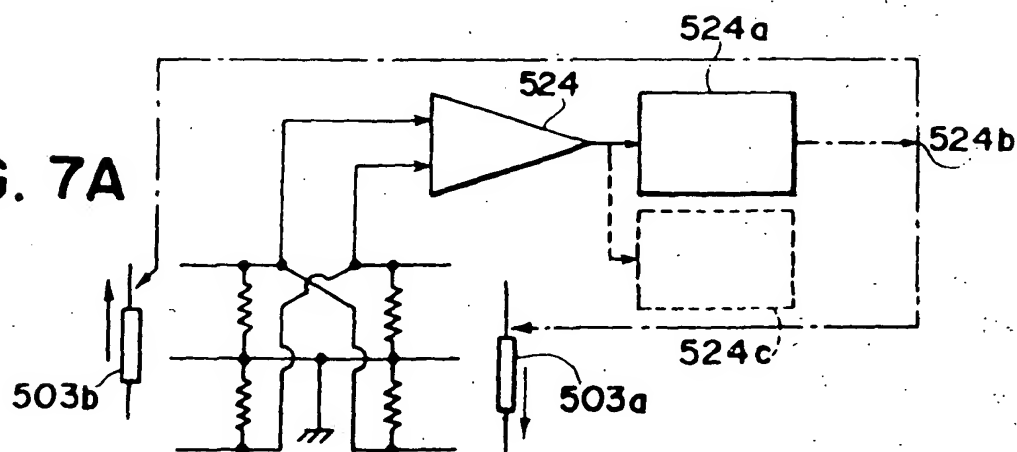


FIG. 8

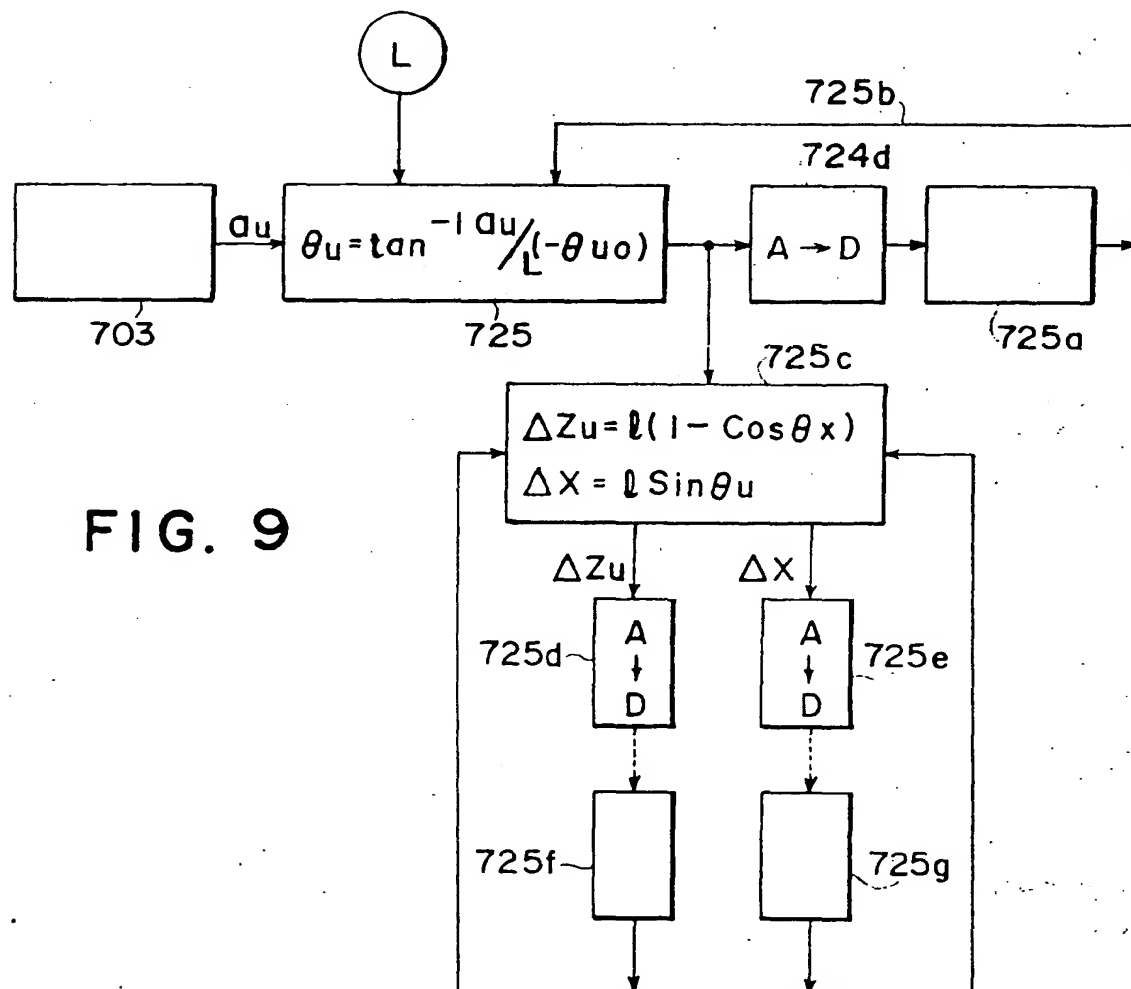
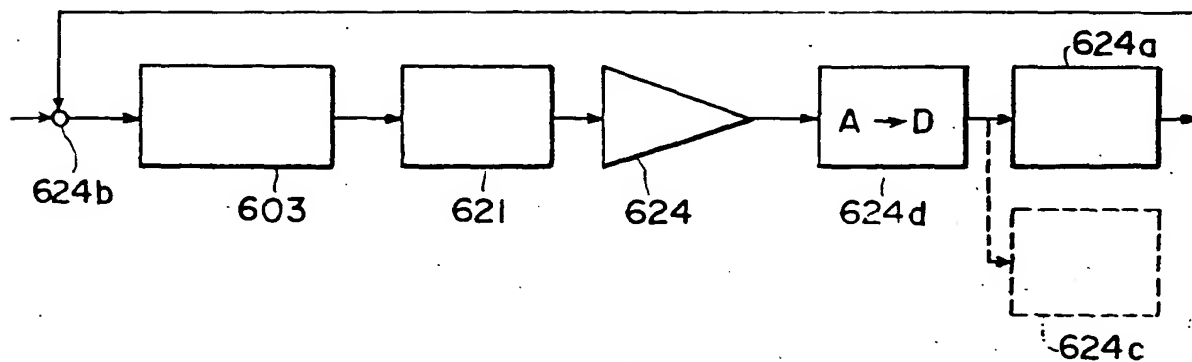


FIG. 9





FIG. 13

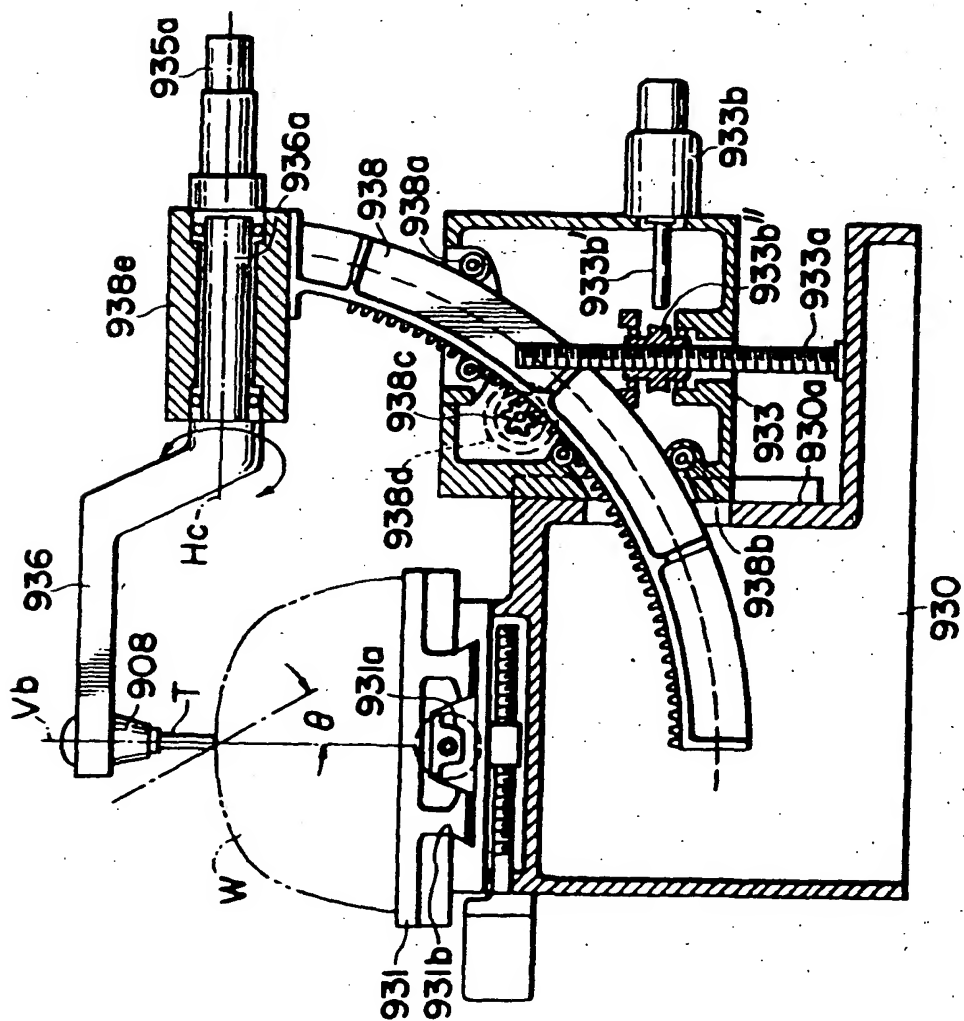


FIG. 14

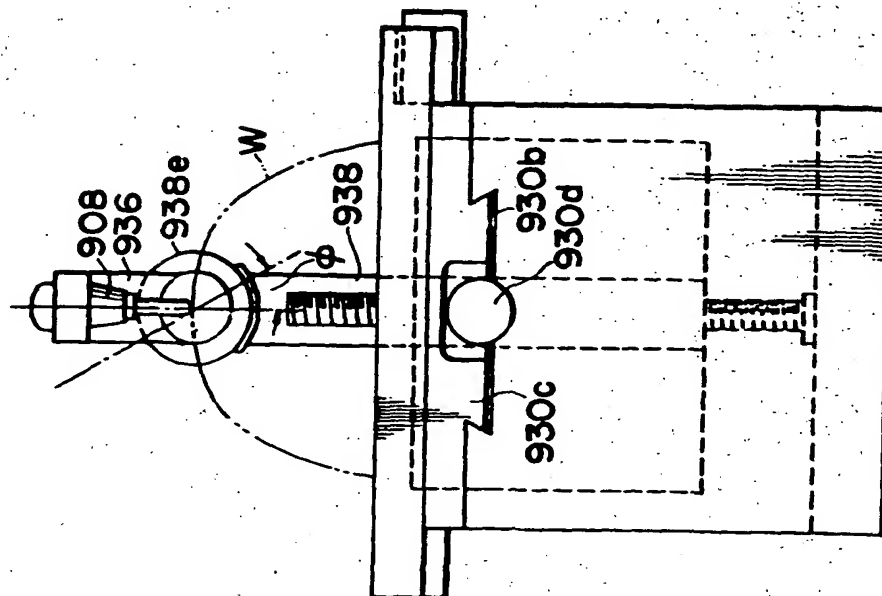




FIG. 15B

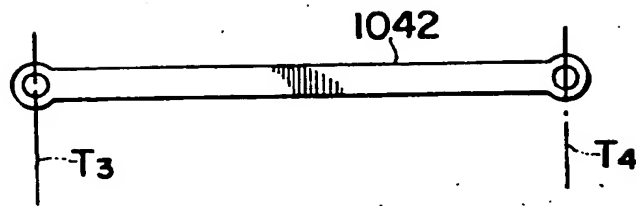
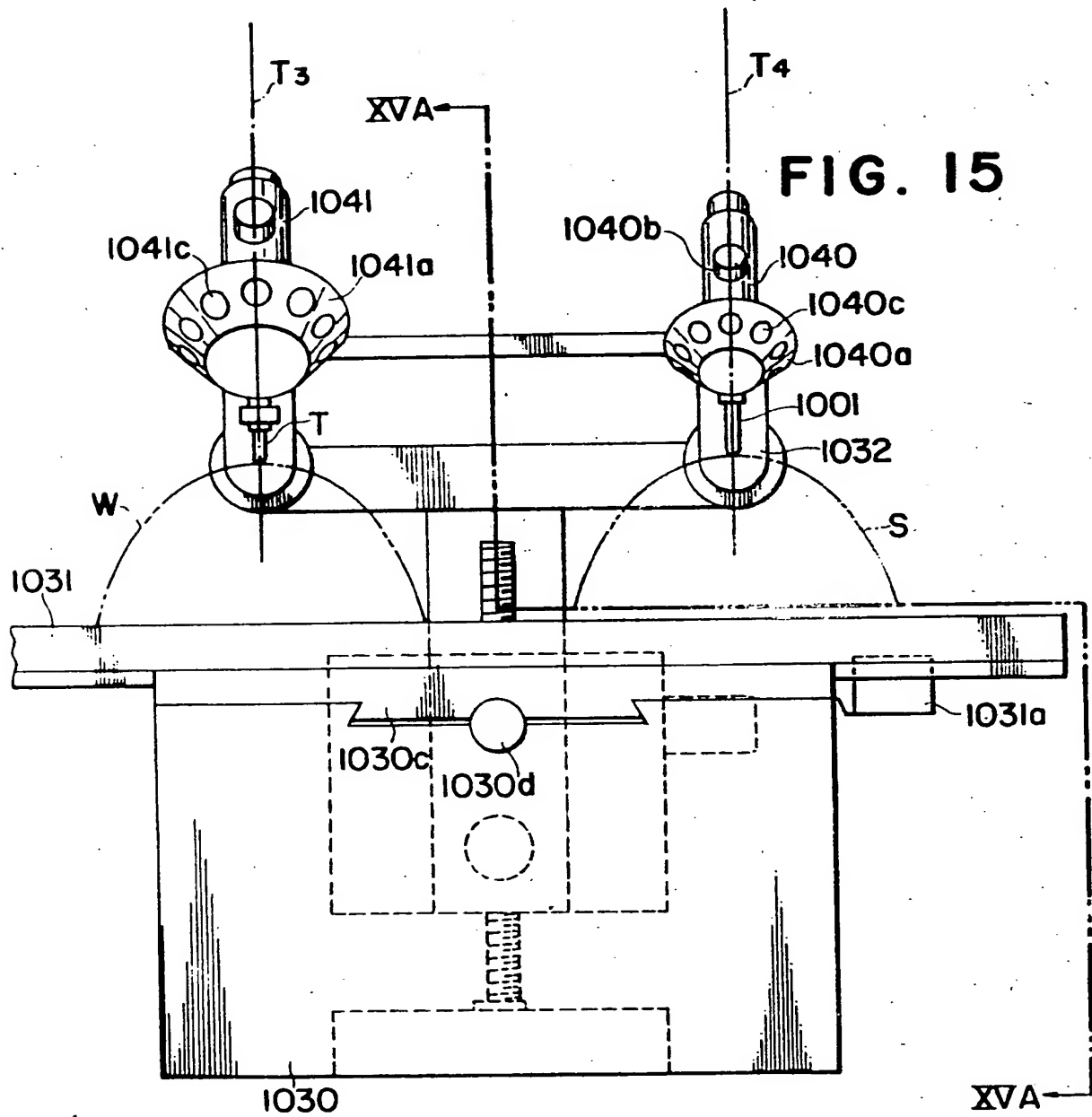
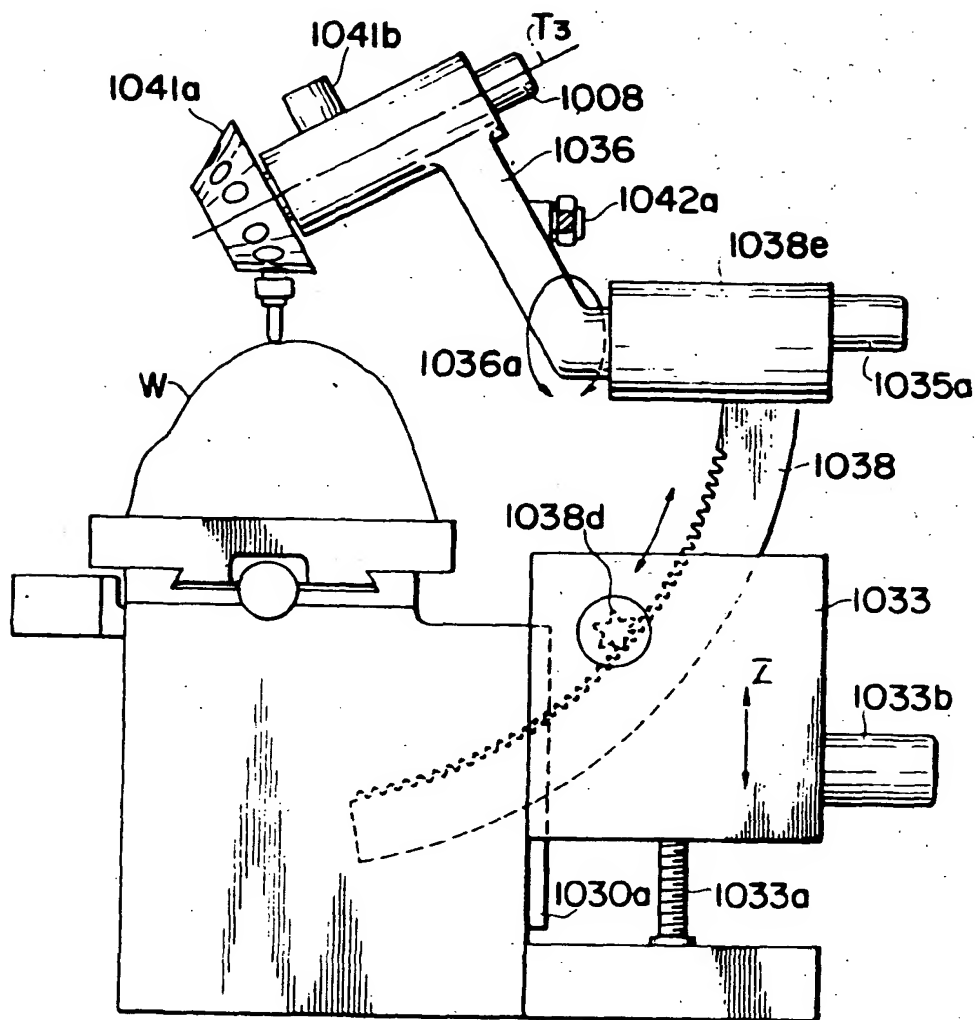


FIG. 15

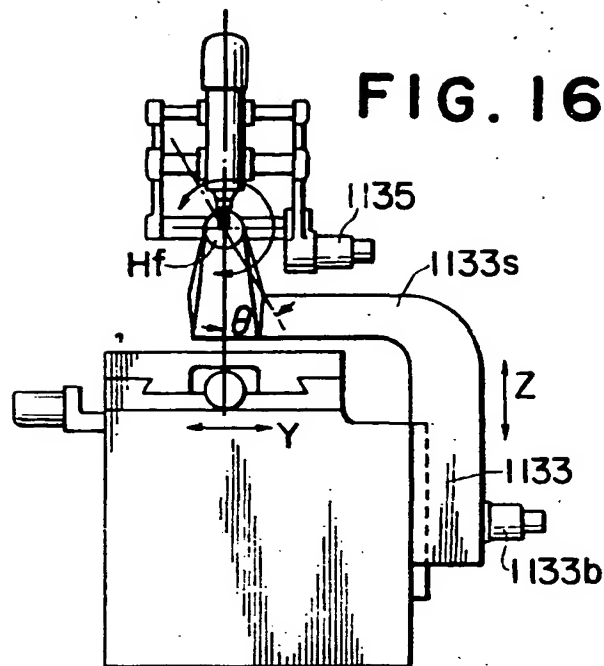


209837/0772

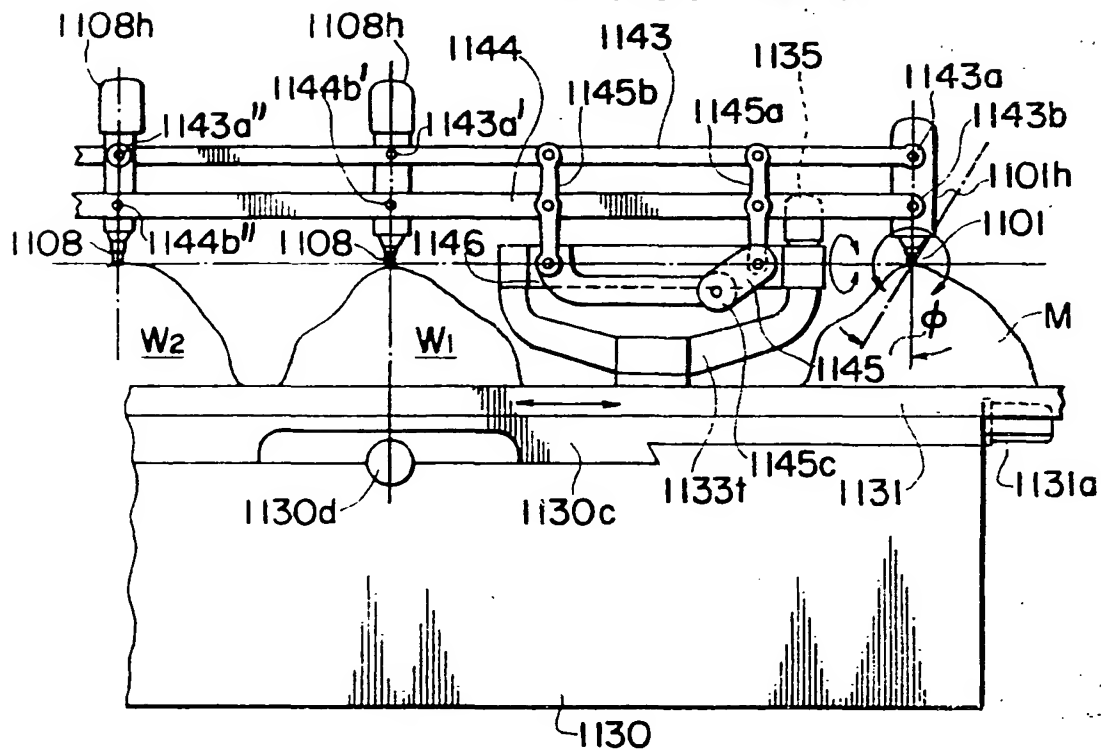
FIG. 15A



**FIG. 16A**



**FIG. 16B**



XVIIA-



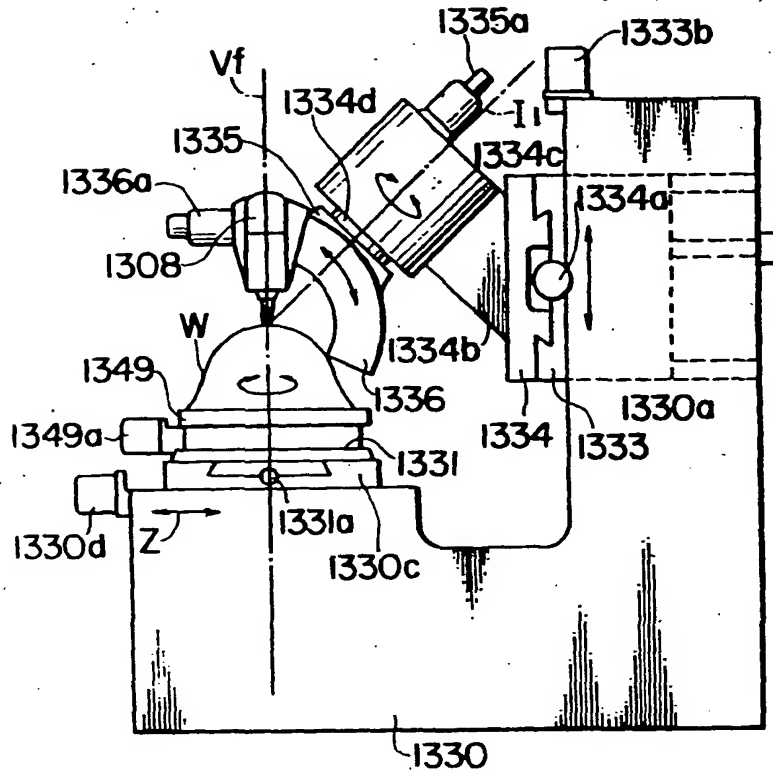


FIG. 18

FIG. 18A

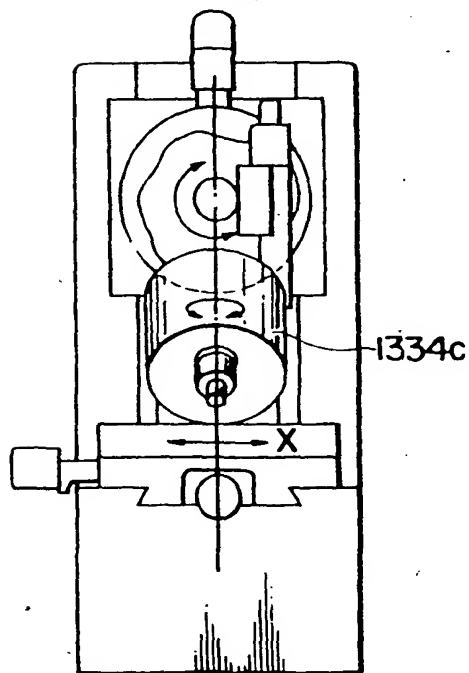


FIG. 18B

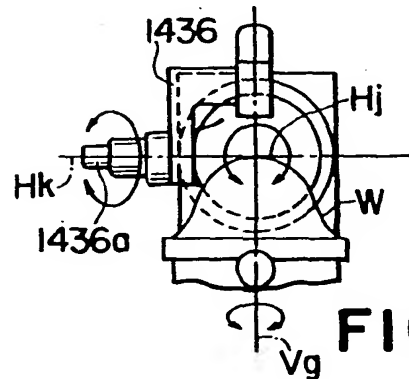
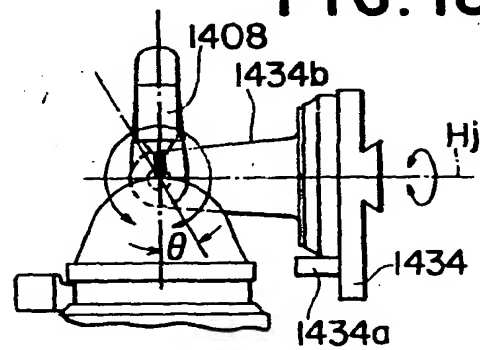


FIG. 18C

FIG. 18D

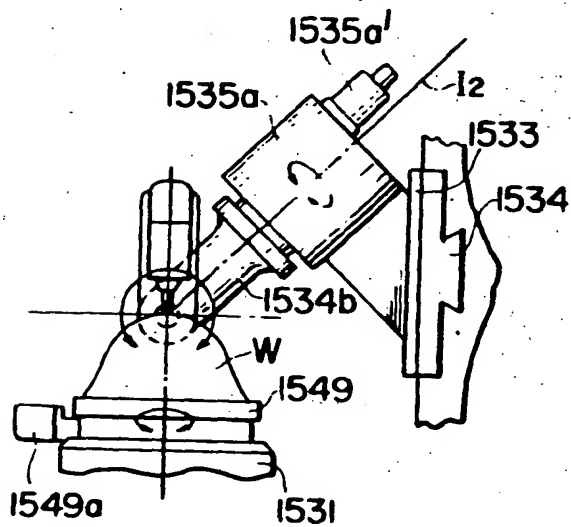


FIG. 18E

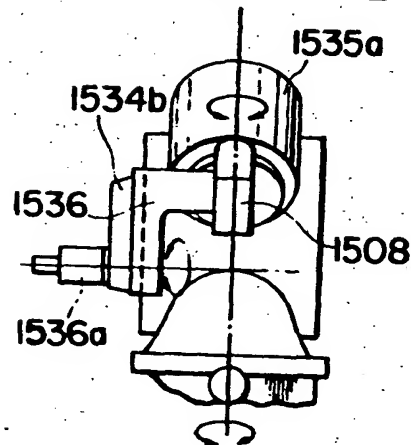


FIG. 19

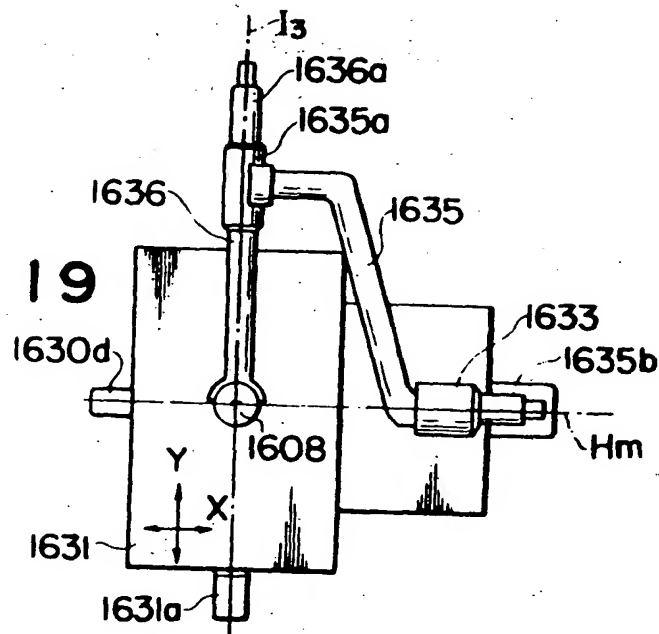
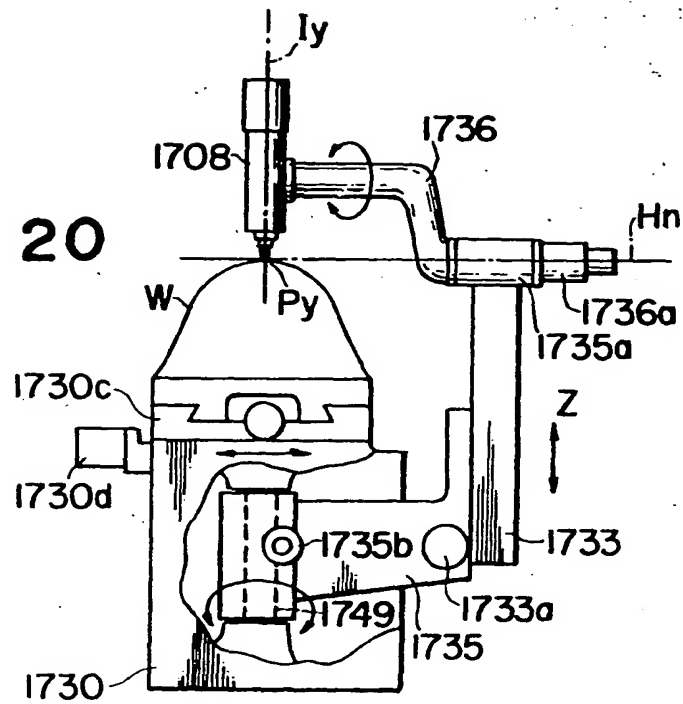


FIG. 20



**FIG. 20A**

